Mesures continues de la vitesse de détonation et du profil de contrainte par fibres optiques à réseau de Bragg

Yohan Barbarin, Alexandre Lefrançois, Magne Sylvain, Vincent Chuzeville, Guillaume Zaniolo, Karol Woirin, Laurent Jacquet, Frédéric Sinatti, Jérôme Luc

▶ **To cite this version:**

Yohan Barbarin, Alexandre Lefrançois, Magne Sylvain, Vincent Chuzeville, Guillaume Zaniolo, et al.. Mesures continues de la vitesse de détonation et du profil de contrainte par fibres optiques à réseau de Bragg. 14ème colloque international francophone sur les Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie (CMOI), Nov 2015, Lannion, France. cea-02549143

HAL Id: cea-02549143
https://cea.hal.science/cea-02549143

Submitted on 21 Apr 2020

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.

Mesures continues de la vitesse de détonation et du profil de contrainte par fibres optiques à réseau de Bragg

Yohan Barbarin[(1)], Alexandre Lefrançois[(1)], Sylvain Magne[(2)], Vincent Chuzeville[(1)], Guillaume Zaniolo[(1)], Karol Woirin[(3)], Laurent Jacquet[(1)], Frédéric Sinatti[(1)], Jérôme Luc[(1)]

(1) CEA, DAM, GRAMAT, F-46500 Gramat
(2) CEA, LIST, Laboratoire Capteurs, Architectures Electroniques, F-91191 Gif-sur-Yvette
(3) Herakles, groupe SAFRAN, CRB, F-91710 Vert-le-Petit

1. Introduction

L'intérêt des réseaux de Bragg photo-inscrits sur des fibres optiques n'est plus à démontrer pour les mesures en quasi-statique de température et de pression dans la prospection pétrolière. L'utilisation de ce type de sonde en dynamique pour mesurer des phénomènes physiques très brefs est beaucoup moins éprouvée. Des réseaux de Bragg à pas variable placés à l'extrémité de fibres optiques sont mis en œuvre et optimisés au CEA Gramat pour effectuer des mesures dynamiques de vitesse de détonation et plus récemment pour mesurer l'évolution du profil de contrainte à des niveaux atteignant plusieurs GPa. Ces fibres faiblement intrusives, de diamètre de l'ordre de 125 µm, avec leurs réseaux de Bragg photo-inscrits de plusieurs dizaines de mm de longueur, peuvent être insérées au cœur d'un matériau énergétique ou inerte [1-3]. Les fibres optiques ont aussi l'avantage d'être immunes aux radiations électromagnétiques et leur bande passante est supérieure à la vitesse des phénomènes à observer. Un état de choc soutenu dure quelques microsecondes, mais les phénomènes transitoires initiaux sont plus rapides, de l'ordre de la dizaine de nanosecondes. Enfin, comme cela va être présenté dans les paragraphes suivants, ces mesures sont continues et non ponctuelles au sein du matériau.

2. Mesure continue de la vitesse de détonation

Les derniers développements du système de mesure de la vitesse de détonation appelé « BraggFast » ont permis de comparer des mesures dites classiques à cette méthode optique innovante sur des tests de détonation en cartouche et des tests dits « du coin » pour l'étude de la Transition Choc – Détonation (TCD). Le principe de fonctionnement du BraggFast est illustré en Figure 1 et plus amplement décrit dans [3-4]. Le réseau de Bragg à pas variable réfléchit une large bande de spectre optique et chaque longueur d'onde correspond à une position le long de ce réseau. Durant la détonation, le front d'onde détruit progressivement le réseau, ce qui induit une réduction de la largeur spectrale. L'intensité du signal réfléchi par le réseau décroît ainsi proportionnellement avec la position du front d'onde le long du réseau. La mesure est continue contrairement aux mesures ponctuelles réalisées par exemple à l'aide de sondes à court-circuit ou piézoélectriques. Le diagramme de marche, qui est la position du front d'onde de choc en fonction du temps, est obtenu après un traitement numérique et un calibrage rigoureux du système BraggFast.

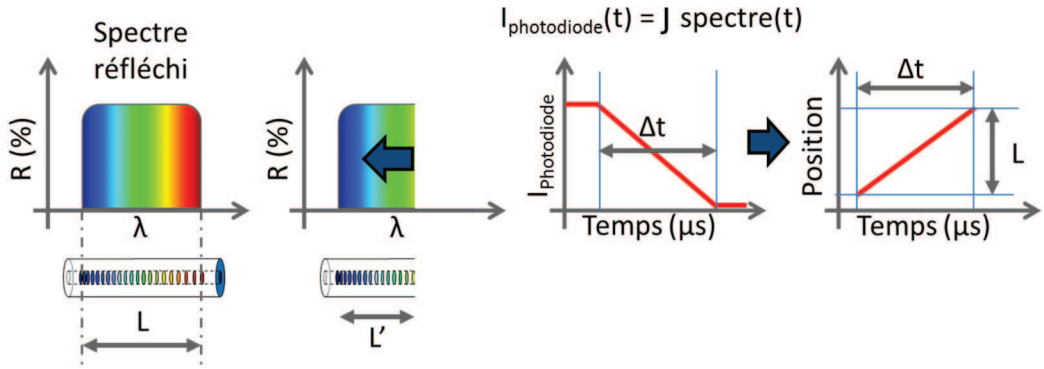

Figure 1. Représentation de la mesure de vitesse par réseau de Bragg à pas variable.

Le traitement numérique utilise le spectre optique réfléchi par le réseau de Bragg juste avant le tir pour s'affranchir des distorsions optiques des différents composants du BraggFast [4]. Cependant, le « chirp » ou en d'autres termes la relation « longueur d'onde – distance » doit être connue. Dans la méthode destructive précédemment utilisée, la fibre était caractérisée optiquement en la polissant par pas de 500 µm [3-4]. Cette méthode directe qui impose de répéter ce type de caractérisation pour chaque nouveau lot de fibres est assez fastidieuse. Depuis, l'utilisation d'un réflectomètre Luna Technologies OBR 4600 a été validée. Il fonctionne selon un procédé de réflectométrie fréquentielle cohérente, i.e. OFDR (Optically Frequency-Domain Reflectometry), et non de type OTDR (Optical Time-Domain Reflectometry) ce qui permet d'atteindre une résolution spatiale de 10 µm. Ce réflectomètre permet de caractériser chaque réseau avant leur montage sur un édifice et même après montage juste avant le tir. Cette caractérisation fournit entre autre le coefficient de réflexion et la phase en longueur d'onde (cf. Figure 2). La pente de la phase nous donne directement la relation longueur d'onde – distance. La longueur effective du réseau peut aussi être déterminée.

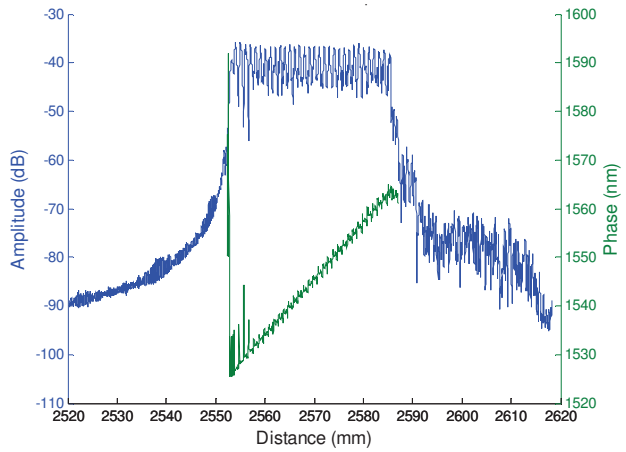

Figure 2. Caractérisation d'un réseau de Bragg avant tir pour déterminer la relation longueur d'onde – distance et mesurer la longueur effective du réseau à l'aide d'un réflectomètre.

Plusieurs expérimentations ont été réalisées au CEA Gramat en plaçant un réseau de Bragg le long de cartouches de matériaux énergétiques. Les cartouches ont un diamètre de 2 pouces (50,8 mm) et une hauteur de 10 pouces (254 mm). Pour mesurer la vitesse de détonation établie, un réseau de Bragg de 36 mm de long est positionné en fin de cartouche. Les résultats pour une cartouche de TNT sont présentés en Figure 3. Préalablement au tir, la réponse du réseau de Bragg, tracée en Figure 3a, a été calculée à partir du spectre optique réfléchi par le réseau et la relation longueur d'onde – distance [4]. La Figure 3b montre le résultat brut obtenu sur l'oscilloscope numérique rapide. La pente décroissante n'est pas parfaitement linéaire à cause des distorsions optiques du système. En confrontant le signal expérimental à la réponse du réseau de Bragg, le diagramme de marche est obtenu, Figure 3c. Le diagramme est très linéaire, cela confirme que nous sommes bien en régime de détonation établi et que le système a été correctement calibré. La pente de ce diagramme correspond à la vitesse de détonation.

La valeur dérivée, (6790 ± 100) m/s, est très proche des mesures classiques par sondes à court-circuit. L'incertitude de mesure sera réduite pour les prochains tirs avec une meilleure estimation de la relation longueur d'onde – distance et en effectuant un contrôle dimensionnel précis du positionnement de la fibre sur l'édifice.

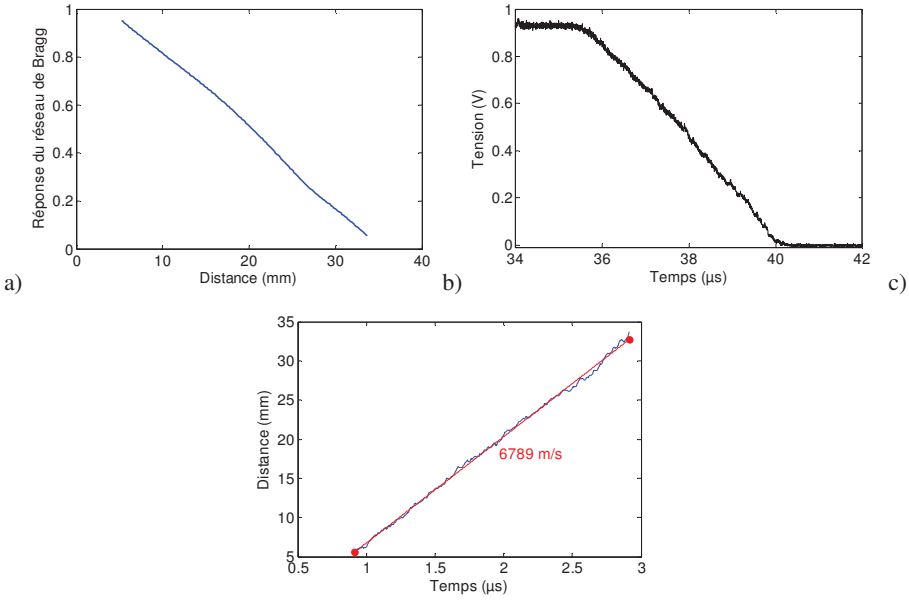

Figure 3. Résultats expérimentaux d'une mesure de vitesse de détonation établie du TNT.

Le diagramme de marche est l'une des mesures importantes pour caractériser de nouveaux matériaux énergétiques notamment pour la phase transitoire. Le but est de déterminer la vitesse de réaction du matériau énergétique et les paramètres de l'équation d'état de ce matériau énergétique non réagi pour pouvoir les utiliser dans des codes hydrodynamiques. Récemment, nous avons réalisé plusieurs tests du coin [5] pour caractériser la TCD à l'aide d'un réseau de Bragg inséré aux cœurs des matériaux énergétiques. La configuration expérimentale et les résultats pour la Comp B sont présentés en Figure 4. La Comp B est fabriquée par un procédé coulé-fondu, elle se compose de 59.5% de RDX, 39.5% de TNT et 1% de cire. La fibre a été coupée pour placer le réseau de Bragg de 19 mm de long à la base du coin. Ensuite, la fibre a été collée et insérée dans une gaine téflon de diamètre intérieur 300 µm et extérieur 700 µm pour assurer un bon centrage dans le trou de 800 µm effectué préalablement dans le coin de Comp B. Lors de l'expérience, le coin de Comp B a été impacté par une plaque d'aluminium de 15 mm d'épaisseur lancée à ~1300 m/s par un lanceur à poudre. Le diagramme de marche obtenu par le système BraggFast est comparé en Figure 4 à ceux fournis par des aiguilles piézoélectriques et par un radio-interféromètre (RIF) similaire à celui décrit dans [6]. Les trois diagrammes de marche se superposent bien, le changement de pente à 84.3 µs montre bien la transition entre le choc et la détonation. Les aiguilles piézoélectriques et le RIF montrent des résultats très similaires. La phase de choc et celle de détonation sont bien reproduites par le réseau de Bragg. Par contre la phase de transition montre un léger retard. Les conditions d'intégration mécanique de la fibre doivent être simulées plus en détails pour analyser l'influence de la gaine téflon sur la répartition idéale de l'état de choc en régime transitoire.

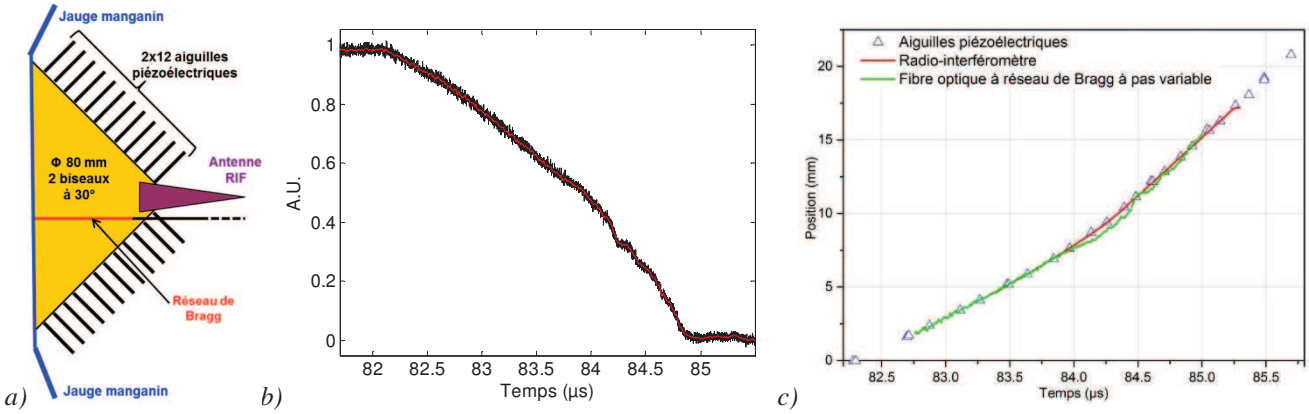

Figure 4. TCD de la Comp B: a) configuration expérimentale du coin, b) signal du BraggFast normalisé, c) diagrammes de marche pour trois types de métrologies.

3. Mesure du profil de contrainte

Le système de mesure dynamique de la Figure 5 permet d'obtenir l'évolution du profil de contrainte lors d'un choc et est basé sur un long réseau de Bragg photo-inscrit à l'extrémité d'une fibre optique. La limite élastique de la silice fondue constituant le cœur de la fibre est de 8.1 GPa et sa limite à la rupture est de l'ordre de 16 GPa [7]. Le module d'Young est non linéaire: en compression celui-ci décroît avec la contrainte jusqu'à 2.3 GPa et croît au-delà [8]. Du point de vue de la mesure optique, la longueur d'onde centrale ($\lambda_c = 2.neff.\Lambda$) du réseau est analysée. En compression, l'indice optique effectif (n_{eff}) croît et le pas du réseau (Λ) décroît. Ce dernier effet est plus prédominant et au final λ_c décroît [9,10]. Le décalage de λ_c en fonction de la contrainte est de l'ordre de -12 nm/GPa mais ce nombre varie grandement en fonction du gainage [11] et de la compression longitudinale et/ou transversale de la fibre. Nos expérimentations ont donc aussi pour but de calibrer le réseau de Bragg utilisé, associé à un type de montage.

Le système optoélectronique utilise un réseau de Bragg légèrement « chirpé » centré à 1605 nm en limite haute de la bande télécom L. Cela permet de couvrir une gamme de contrainte de 0 à ~6 GPa avec une source optique s'arrêtant au début de la bande télécom C vers 1530 nm. La mesure du spectre en dynamique est assurée par un spectromètre optique de type Czerny-Turner couplé à une barrette de photodiodes 300 MHz avec 16 pixels. Les signaux de chaque pixel doivent être convertis en tension et amplifiés sur une gamme de fréquences la plus large possible. Le système actuel a une bande passante à -3 dB allant du continu à 120 MHz.

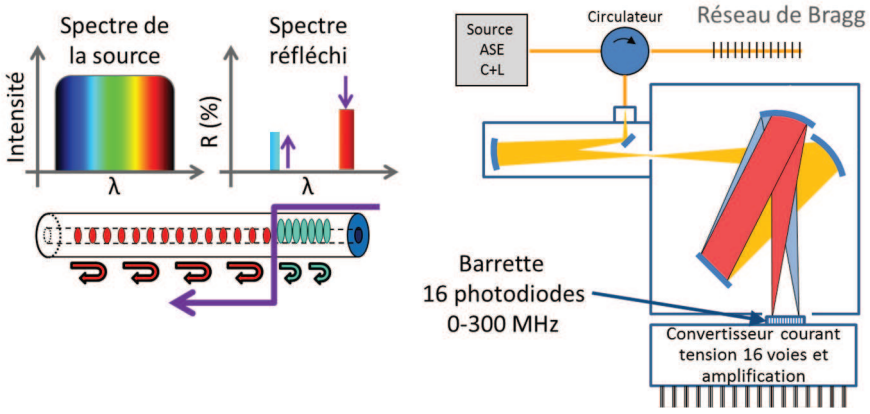

Figure 5. Représentation de la mesure de contrainte par réseau de Bragg et illustration de l'instrumentation basée sur un spectromètre rapide.

Les premières expériences ont été réalisées à l'aide d'un lanceur à gaz. Le projectile et la cible sont en aluminium de type 6061T6 et font 90 mm de diamètre. Les épaisseurs sont respectivement de 20 mm pour l'impacteur et 50 mm pour la cible. Deux jauges piézorésistives, une en manganin et une en carbone, sont implantées dans la cible à 10 mm de la surface d'impact, orthogonalement à la

propagation de l'onde de choc. Le réseau de Bragg est lui placé au centre de la cible dans un trou de diamètre 400 ou 700 µm. En pratique, la fibre est collée directement dans la cible ou gainée comme dans le « test du coin » précédent avec du téflon, dont nous connaissons bien les propriétés mécaniques. Les expériences ont par ailleurs été dimensionnées par simulations numériques. Pour des vitesses d'impact de 300, 500 et 800 m/s, nous obtenons au centre de la cible un palier de pression sur ~30 mm de respectivement 2,1, 3,6 et 6,1 GPa. Pour la vitesse de 500 m/s, la répartition spatiale de la pression hydrodynamique en configuration 2D axisymétrique est représentée sur la Figure 6 à l'instant t_0+6 µs après impact.

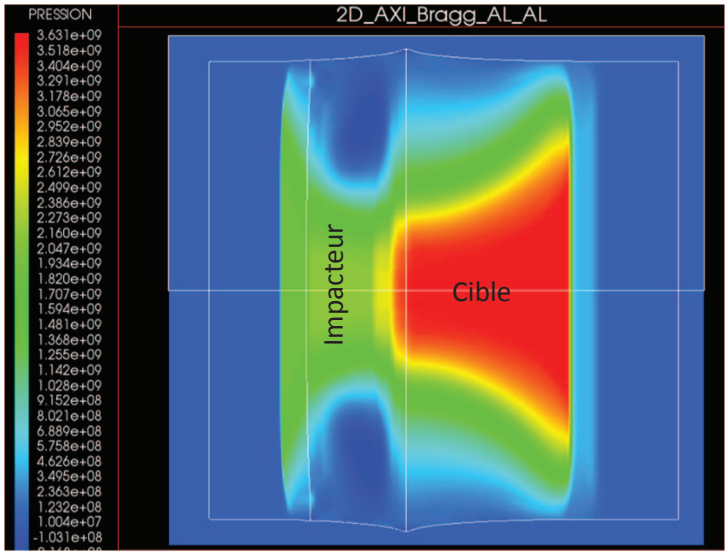

Figure 6. Simulation numérique 2D axisymétrique d'un choc, cas Al-Al à 500 m/s. Champ de pression à t = 6,0 µs.

Cinq essais ont été réalisés comme listés dans le Tableau 1. Les niveaux de pression mesurés par les jauges piézoélectriques sont proches des valeurs théoriques mais avec des incertitudes assez larges dues à des problèmes d'alimentations. Les trois premiers essais ont montré que la fibre se brise de plus en plus fréquemment lorsque que le niveau de contrainte augmente. Les simulations hydrodynamiques montrent un pic de surpression au niveau du front d'onde, ce pic de surpression immédiatement suivi d'une détente peut expliquer la rupture de la fibre. Deux essais supplémentaires ont été effectués sans téflon uniquement avec de la colle comme interface entre la silice et l'aluminium. Le tir 5, où le diamètre du trou est identique aux trois premiers tirs mais où le réseau de Bragg est seulement collé n'est pas satisfaisant non plus. La fibre se brise continument.

Tableau 1 : Vitesses de projectile et pressions de choc obtenues

Tir	**Pression attendue (GPa)**	**Vitesse d'impact (m/s)**	**Pression (GPa)** Jauges piézorésistives	**Configuration**
1	**2.1**	**315,1 ± 6.3**	**X**	**Ø 700µm téflon**
2	**3.6**	**515,1 ± 10,3**	**3,99 ± 0,8** manganin	**Ø 700µm téflon**
3	**6.1**	**816,6 ± 16,3**	**6,90 ± 1,4** manganin **6,34 ± 0,5** carbone	**Ø 700µm téflon**

4	**3.6**	**521,6 ± 10,4**	**4,46 ± 0,34** carbone	**Ø 400µm** **Colle**
5	**3.6**	**510.7 ± 10,4**	**3,56 ± 0,41** carbone	**Ø 700µm** **Colle**

Le tir 4 à 522 m/s est le plus pertinent concernant la mesure continue du palier de pression. Le diamètre du trou dans lequel la fibre de Bragg est collée est seulement de 400 µm. Les signaux relevés sur les voies 3 à 10 du spectromètre rapide sont tracés en Figure 7. Dans cette configuration, nous observons que la fibre n'est pas cassée durant le choc, les signaux ne sont interrompus qu'au moment où le choc arrive à la face arrière de la cible par le mécanisme d'écaillage de la fibre. La voie 7 du système optoélectronique est même saturée. Pour le moment, ces signaux ne peuvent pas être directement comparés à la simulation hydrodynamique car les équations d'états et du comportement élastique de la colle ne sont pas intégrées dans notre code. Pour tout de même illustrer le comportement global, les signaux expérimentaux sont comparés, en figure 8, à un cas de simulation où le trou de 400 µm est entièrement comblé par la silice-fondue, c'est un cas idéal mais non réalisable.

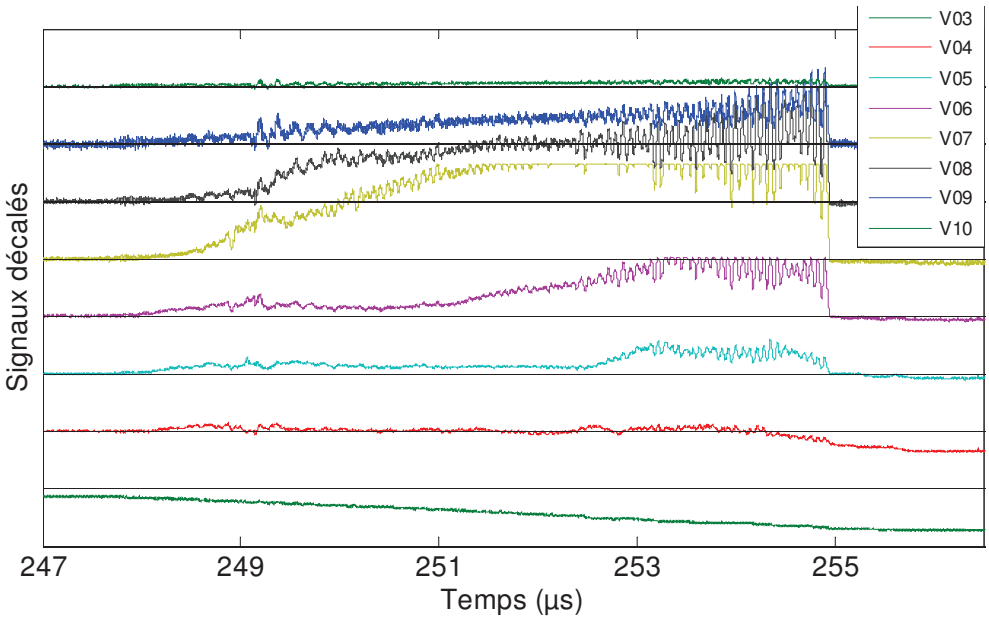

Figure 7 : Tir 4, signaux des voies 3 à 10 du spectromètre normalisés par les coefficients d'amplification et d'intensité de la source.

Dans la Figure 7, de t_0 = 247,5 µs à t = 251,2 µs, le décalage spectral le plus élevé est enregistré sur les voies 7 et 8 par une augmentation constante des signaux. Ceci montre que le palier de pression dans la silice est relativement constant pendant 3,7 µs, soit sur ~20 mm. C'est également le cas dans la simulation tracée en Figure 8a mais le palier de pression dans la silice dure pendant 6.0 µs après le choc, soit sur ~33 mm. Ce maintien sur une durée plus longue pourrait peut-être s'expliquer par la non-prise en compte de la désadaptation d'impédance induite par la colle. Le décalage en longueur d'onde relevé est plus faible que pour les tirs précédents (10,0 ± 1.1 nm/GPa), il est pour ce quatrième tir de l'ordre de (8,0 ± 1.4) nm/GPa. Dans un deuxième temps, les détentes latérales font décroître le niveau de pression à l'arrière du choc comme illustré dans la Figure 8b. Cela est visible, expérimentalement avec des signaux répartis sur toutes les voies à partir de t = 253,0 µs. L'intégration des équations d'états et du comportement élastique de la colle est essentielle pour mieux exploiter ces résultats expérimentaux. Par ailleurs, un nouveau système en optique intégrée avec 40 voies de mesures est en cours de validation offrant ainsi une meilleure résolution spectrale. Les seuls résultats publiés à ce jour [12,13] sont limités à 12 voies de mesures.

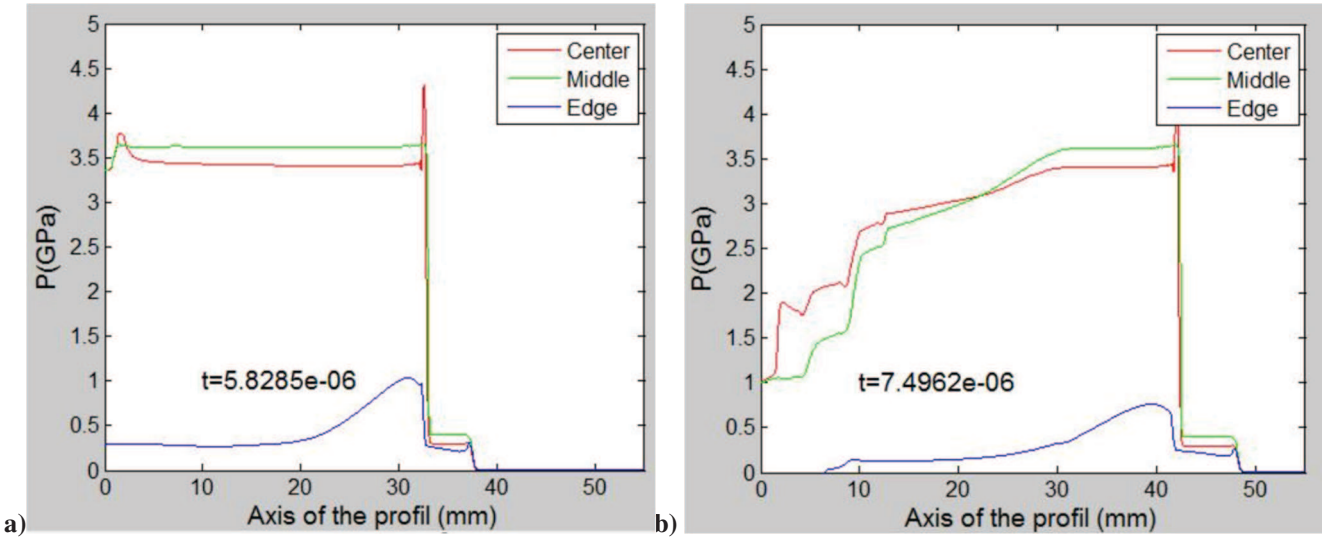

Figure 8. Profils de pression simulés à 5,82 µs et 7,50 µs après le choc. Les profils de pression sont : en rouge dans la fibre, en vert dans l'aluminium à 1 mm du centre et en bleu à 5 mm du bord extérieur.

4. Conclusion

Deux systèmes de mesures dynamiques basés sur l'utilisation de réseaux de Bragg à pas variable ont été présentés. Le premier, le système BraggFast pour la mesure continue de vitesse de détonation est maintenant régulièrement utilisé au CEA Gramat dans différentes expériences de détonique. Le deuxième, un spectromètre rapide pour la mesure du profil de contrainte au sein de matériaux inertes ou énergétiques est en cours de développement et les premiers résultats ont été détaillés.

Le BraggFast mesure le diagramme de marche du front de choc dans un matériau énergétique. La relation longueur d'onde – distance est dorénavant mesuré pour chaque réseau de Bragg avec un réflectomètre optique pour s'affranchir des distorsions optiques du système. Dans le cas d'une détonation établie, la vitesse de détonation correspond à la pente du diagramme de marche. Cela a été illustré dans ce travail pour une cartouche de TNT avec une vitesse de détonation de (6790 ± 100 m/s). Dans le cas de transition choc – détonation, le point de détonation peut être mesuré en temps et position ainsi que la vitesse de choc et la vitesse de détonation. Cela a été démontré avec un réseau de Bragg au cœur du coin de Comp B. Davantage d'expériences et de simulations numériques vont être réalisées pour étudier l'intégration mécanique du réseau de Bragg lors d'une transition choc – détonation.

Les premiers résultats expérimentaux du spectromètre rapide analysant le réseau de Bragg sous choc démontrent que le concept spectrométrique fonctionne pour la mesure de pression. Le décalage en longueur d'onde est de (8,0 ± 1.4 nm/GPa). Le couplage entre le matériau sous choc et la fibre est cependant très sensible suivant le type de montage. La gaine téflon permettant de protéger le réseau de Bragg et de le centrer dans le trou effectué dans la cible est à éviter. Les expériences et les simulations hydrodynamiques 2D montrent que le réseau est détruit au fur et à mesure que le choc progresse au sein du matériau. Le meilleur résultat a été obtenu sans téflon avec un réseau de Bragg collé dans un trou de seulement 400 µm. Sans connaître les propriétés hydrodynamiques de la colle, le comportement global de l'expérience a quand même pu être comparé aux simulations numériques et cela concorde. La suite de ce travail sera d'intégrer dans notre simulation hydrodynamique les équations d'états et du comportement élastique de la colle et de réaliser de nouvelles expériences en testant d'autres matériaux. Enfin, à terme, un algorithme inverse en développement permettra de remonter au profil de contrainte au cœur de la cible en fonction du temps à partir des spectres temporels [14].

5. Bibliographie

1. G. RODRIGUEZ et al. “Chirped fiber Bragg grating detonation velocity sensing”, Rev. Sci. Instr., Vol. 84, 015003, pp. 1-10 (2013)
2. J. BENTEROU et al. “Embedded fiber optic Bragg grating (FBG) detonation velocity sensor” Proc. SPIE 7316, Fiber Optic Sensors and Applications VI, 73160E (2009)
3. S. MAGNE et al. “Real-time, distributed measurement of detonation velocities inside high explosives with the help of Chirped Fiber Bragg Gratings”, Proc. SPIE 8794, Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors, 87942K (2013)
4. Y. BARBARIN et al. “Optimization of detonation velocity measurements using a Chirped Fiber Bragg Grating”, Proc. SPIE, Fiber Optic Sensors and Applications XII, 94800S-1 (2015)
5. V. CHUZEVILLE et al. “Detonation initiation of heterogeneous melt-cast high explosives” Proc. Europyro 2015, p.485, (2015)
6. V.M. BEL’SKII et al. “Microwave Diagnostics of Shock-Wave and Detonation Process” Combustion, Explosion and Shock Waves. 47(6), 639-650. (2011)
7. H. SUGIURA et al. “Dynamic response of fused quartz in the permanent densification region” J. Appl. Phys., Vol. 52, pp. 3375-3382 (1981)
8. K. KONDO et al. “Nonlinear pressure of the elastic moduli of fused quartz up to 3GPa” J. Appl. Phys., Vol. 52, pp. 2826-2831 (1981)
9. N. MOHAMMAD et al. “Analysis and development of a tunable fiber Bragg grating based on axial tension/compression” J. Light. Tech., Vol. 22, 8, pp. 2001-2013 (2004)
10. P. ANTUNES et al. “Mechanical properties of optical fibers” Selected Topics on Optical Fiber Technology, Chapter 19, pp. 537-550, Intech, ISBN 978-953-51-0091-1 (2012)
11. S.-C. HER et al. “Effect of coating on the strain transfer of Optical Fiber Sensors”, J. Sensors, Vol. 11, pp. 6926-6941 (2011)
12. E. SHAFIR et al. “Comparison of FBG responses to static and dynamic pressures” 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors, Proc. SPIE, Vol. 9157, 915713 (2014)
13. R.L. SANDBERG et al. “Embedded optical probes for simultaneous pressure and temperature measurements of materials in extreme conditions” J. Phys.: Conference Series 500, Vol. 142031 (2014)
14. F. CASAGRANDE et al. “From the reflected spectrum to the properties of a fiber Bragg grating: a genetic algorithm approach with application to distributed strain sensing” J. Applied Optics, Vol. 41, No. 25, pp. 5238-5244 (2002)