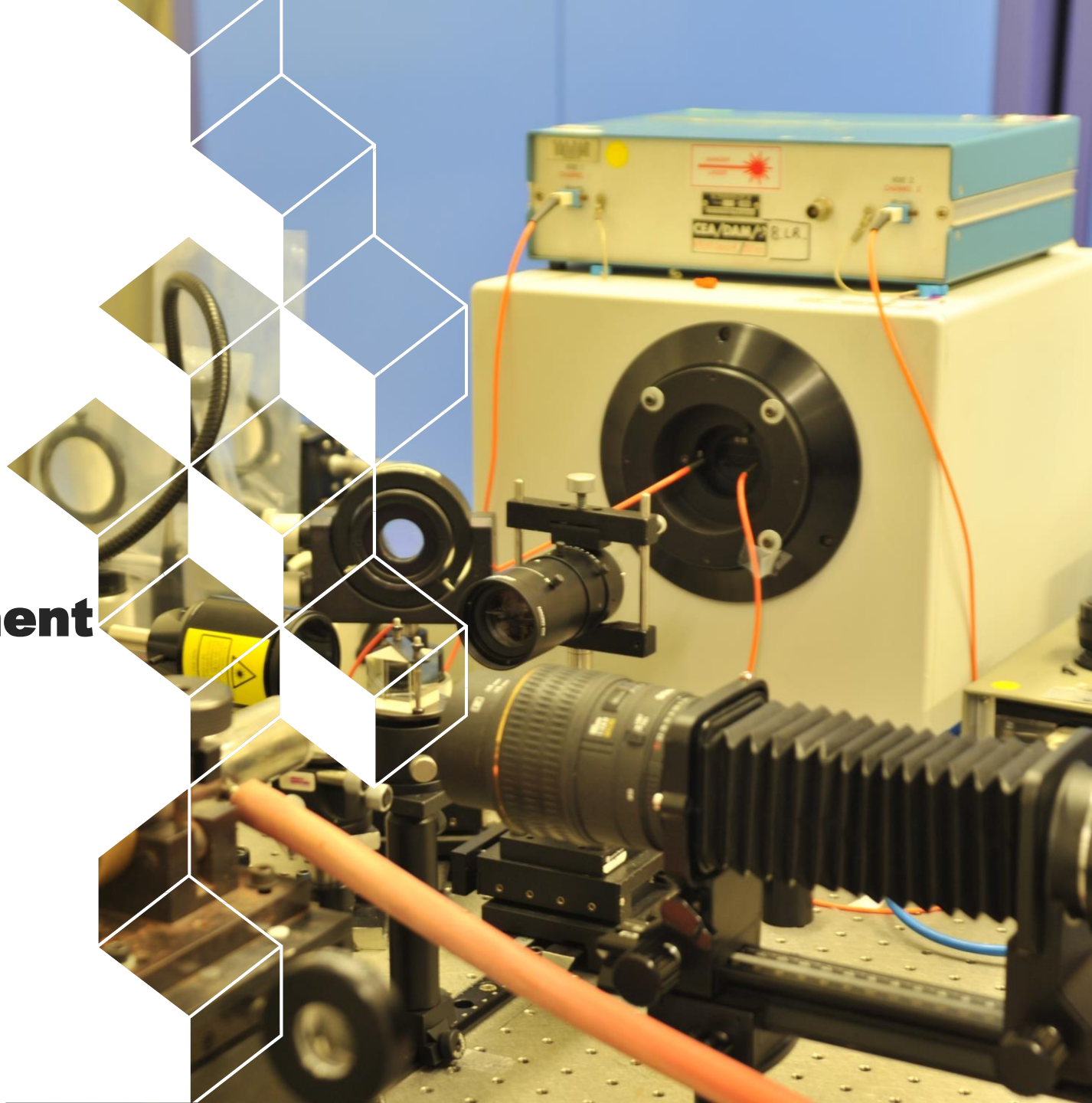
Détonateurs optiques pour l'étude du comportement sous choc des matériaux énergétiques : systèmes aériens et fibrés



P. Hébert

CEA, DAM, Le Ripault, F-37260, Monts, FRANCE

Introduction

- **L'étude du comportement sous choc des matériaux énergétiques nécessite de générer des chocs plans reproductibles dans une large gamme de pressions et de durées**

- **Pour ce faire, on utilise généralement des lanceurs à gaz ou à poudre**

- **Mais ceci présente quelques inconvénients :**

  - Besoin d'installations et d'équipes conséquentes
  - Besoin d'une quantité d'explosifs importante

→

- **Nous avons choisi de développer un générateur de chocs à échelle réduite : un système d'amorçage optique aérien de type slapper**

- **Nous utilisons ce système pour développer un détonateur optique fibré pour dalle de tir**

Sommaire

1) **Système d'amorçage optique aérien**
   - Description et performances
   - Diagnostics disponibles pour les expériences de chocs

2) **Exemples d'applications**

3) **Détonateur optique fibré**
   - Description et performances

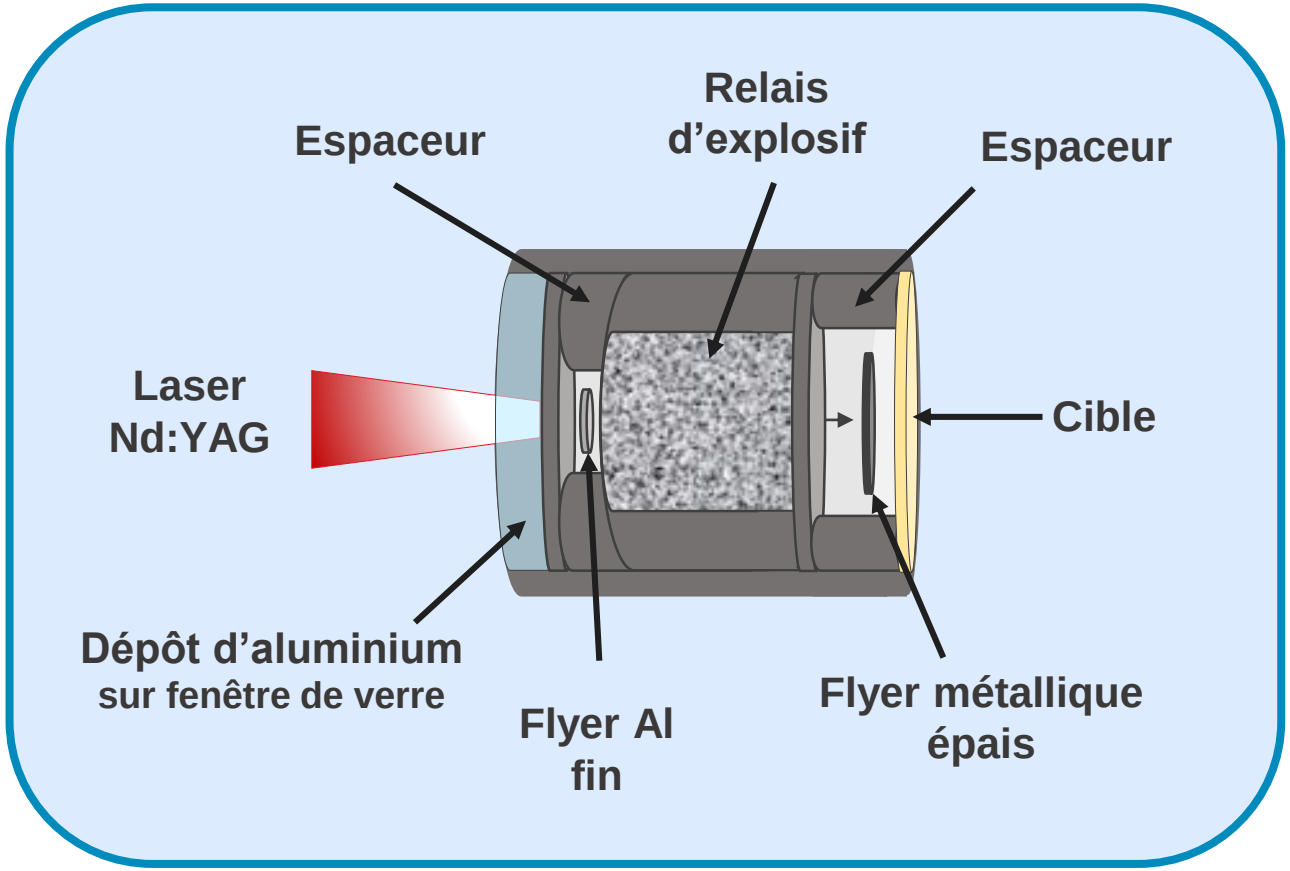
1. Système d’amorçage optique aérien

Le GCOPY (Générateur de Chocs Opto-PYrotechnique

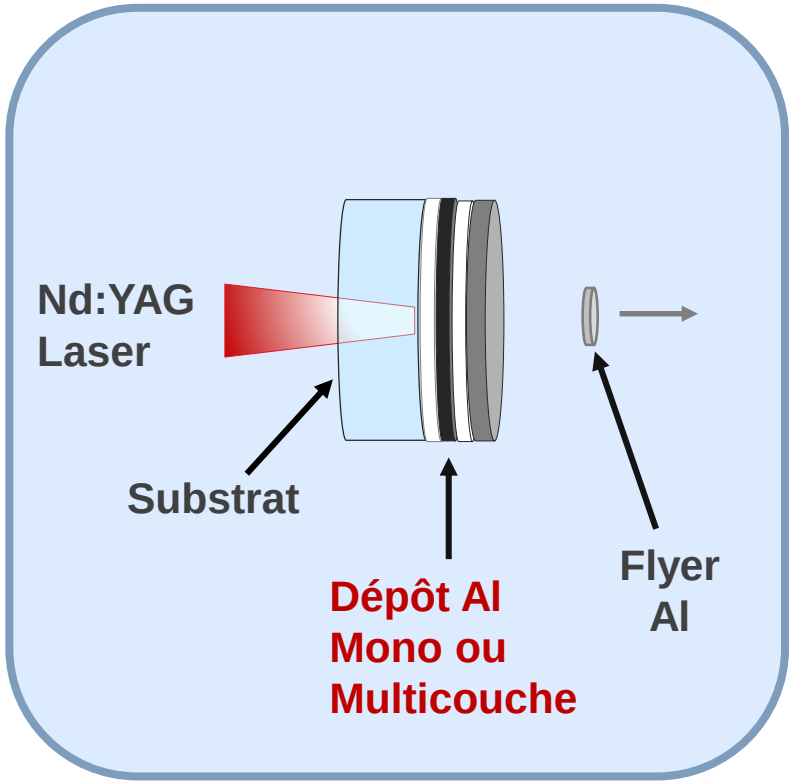
Générateur de chocs à deux étages

Génération de projectiles par laser
+
Génération de projectiles par explosif

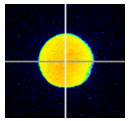
Détonateur optique aérien



Le GCOPY - Premier étage
Génération de projectiles (flyers) par laser



Nd:YAG laser	1064 nm, 6 ns, Ø = 0,5 à1 mm		
Substrat	BK7	h = 1 mm	40 J/cm^2 max



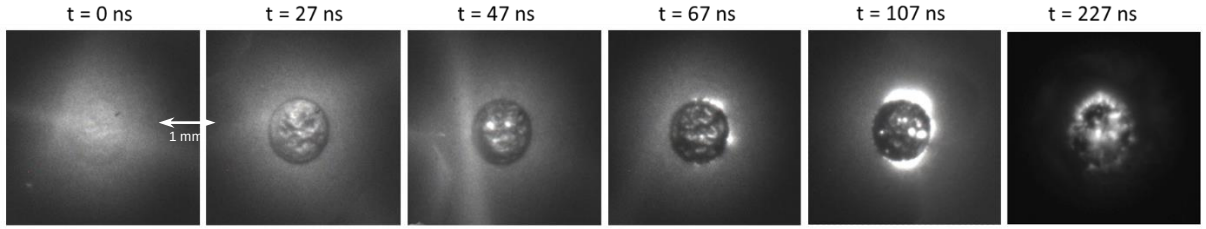
Profil
Top-Hat

Couche d'absorption	Ti	0,01 µm	multicouche
Couche d'ablation	C	0,5 µm	multicouche
Barrière thermique	Al_2O_3	0,5 µm	multicouche
Flyer	Al	4 à 15 µm	multicouche

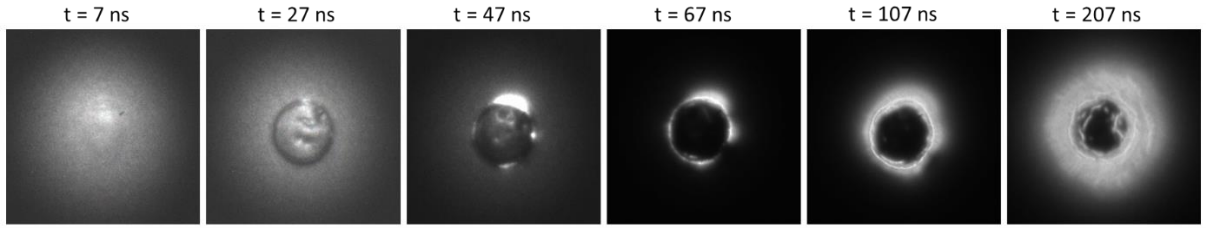
Caractérisation des flyers

Visualisation en vol

Monocouche : Al (7µm)



(a)

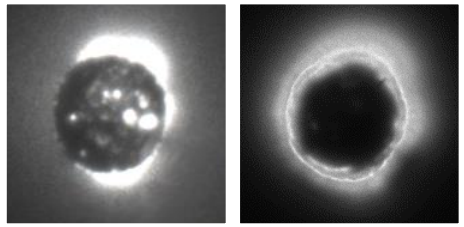


(b)

Quadricouche

Ti 0,01/ C 0,5/ Al_2O_3 0,5/ Al 7µm

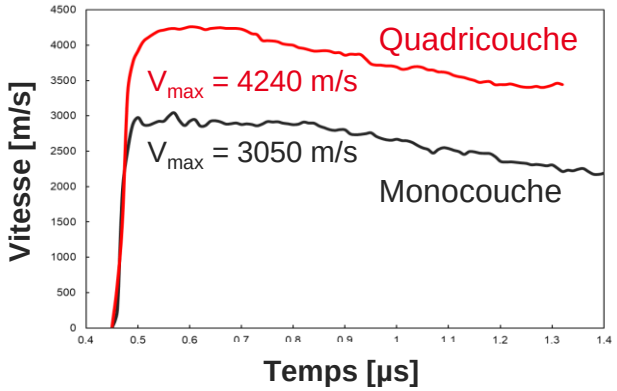
Visualisation à l'impact



Monocouche Quadricouche

- Meilleure intégrité pour le quadricouche

Mise en vitesse



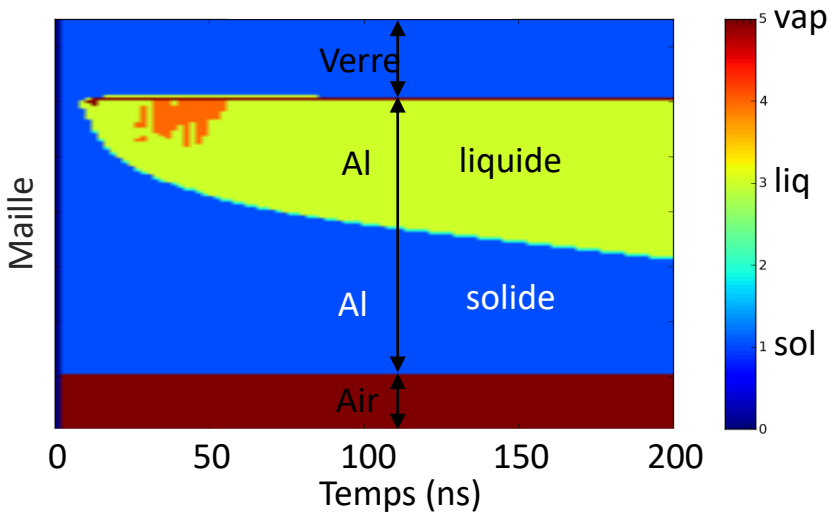
- Vitesse plus élevée pour le quadricouche

Génération de projectiles par laser
Comparaison entre flyers monocouche et multicouche

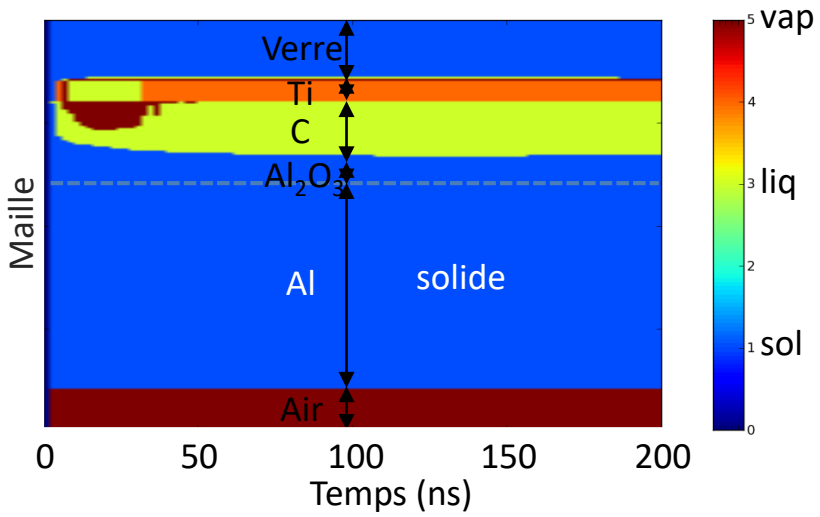
Simulations avec le code d'interaction laser-matière Esther développé au CEA

Fluence laser = 30 J/cm²

Monocouche
Al 7 µm



Multicouche
Ti 0,01/ C 0,5/ Al_2O_3 0,5/ Al 7µm



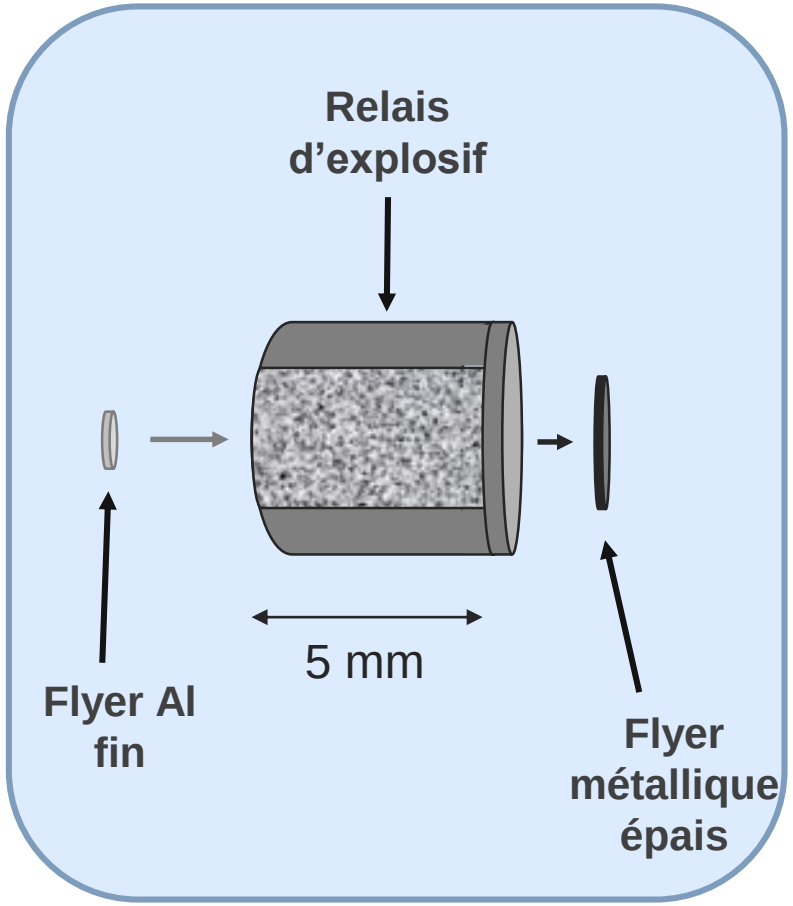
Etat physique du flyer

Le flyer monocouche est partiellement fondu

Le flyer multicouche reste solide

→ **Meilleur rendement avec le dépôt multicouche**

Le GCOPY - Deuxième étage
Génération de projectiles par explosif



Relais d'explosif (Poudre pressée)	PETN d = 1 HMX d = 1,45 ou d= 1,65 Diamètre = 0,7 à 4 mm
Flyer métallique Al, Acier, Cu,..	Epaisseur = 20 à 500 µm Diamètre = 0,7 à 4 mm

Performances

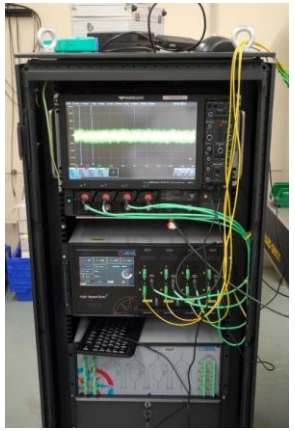
Vitesses jusqu'à 5 km/s
Pressions ~ 50 GPa suivant le matériau cible
Temps de maintien des chocs : 10 à 200 ns
Diamètre projectiles Ø = 0,5 à 4 mm
Bonne planéité

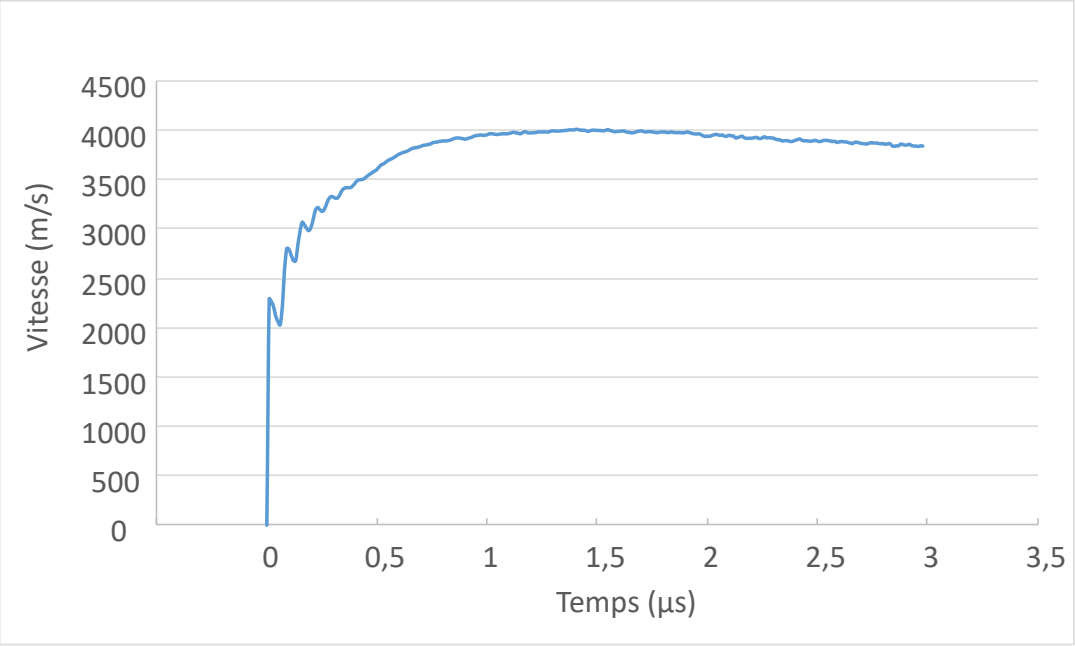
Caractérisation des flyers propulsés par explosif

HMX 1,45 + Al 200 µm Ø = 4 mm

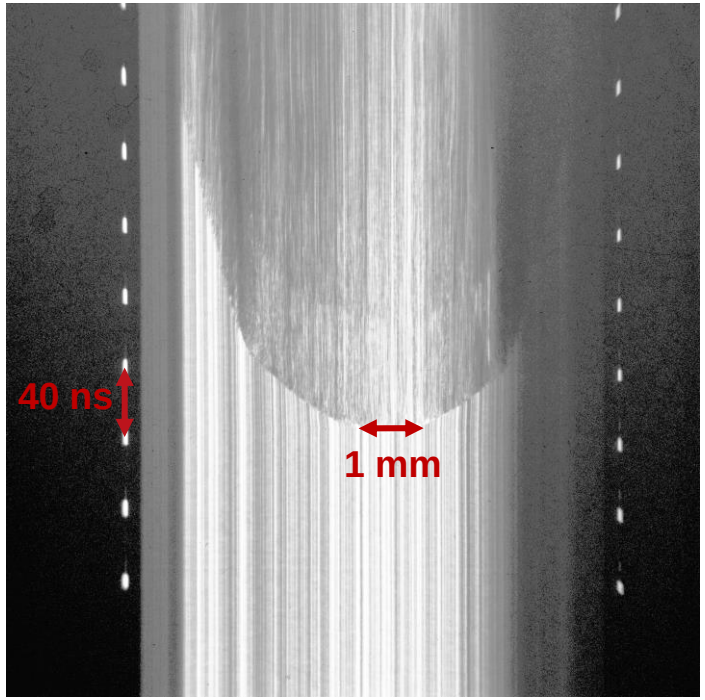
Mise en vitesse - mesures par Vélocimétrie Hétérodyne

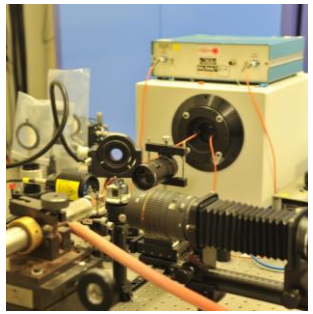
VH





Planéité – Visualisation d'impact par Caméra à Balayage de Fente



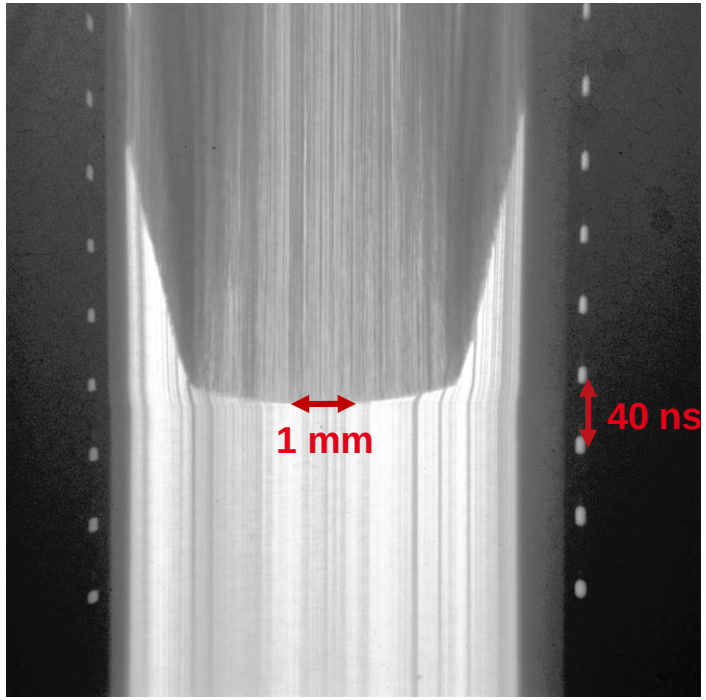


Bonne planéité sur 1 mm

Caractérisation des flyers propulsés par explosif

Amélioration de la planéité en utilisant un double relais

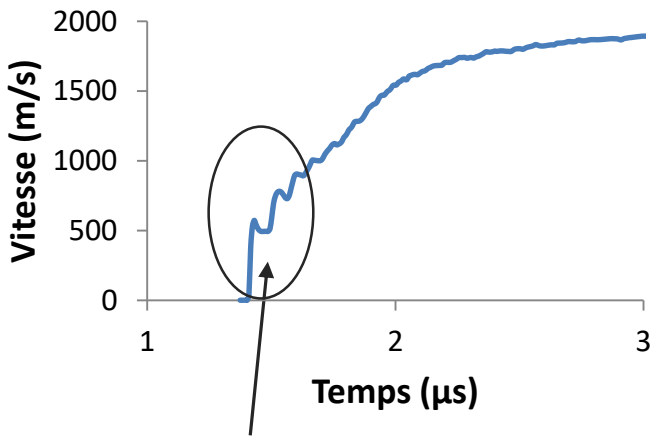
HMX 1,45 + HMX 1,65 Al 200 µm Ø = 4 mm



Bonne planéité sur 4 mm

Le cas des faibles pressions

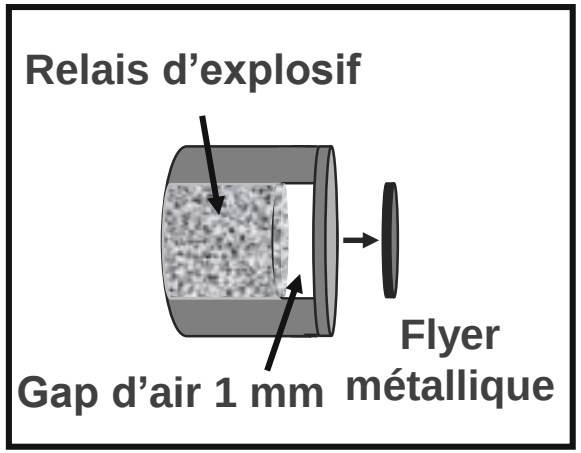
PETN + Acier 200 µm

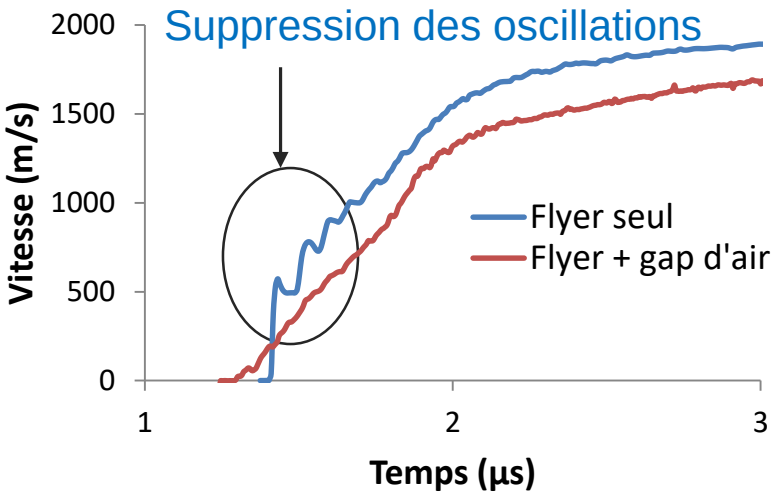


Oscillations aux faibles vitesses

Difficile de générer des pressions inférieures à 5 GPa avec une bonne précision

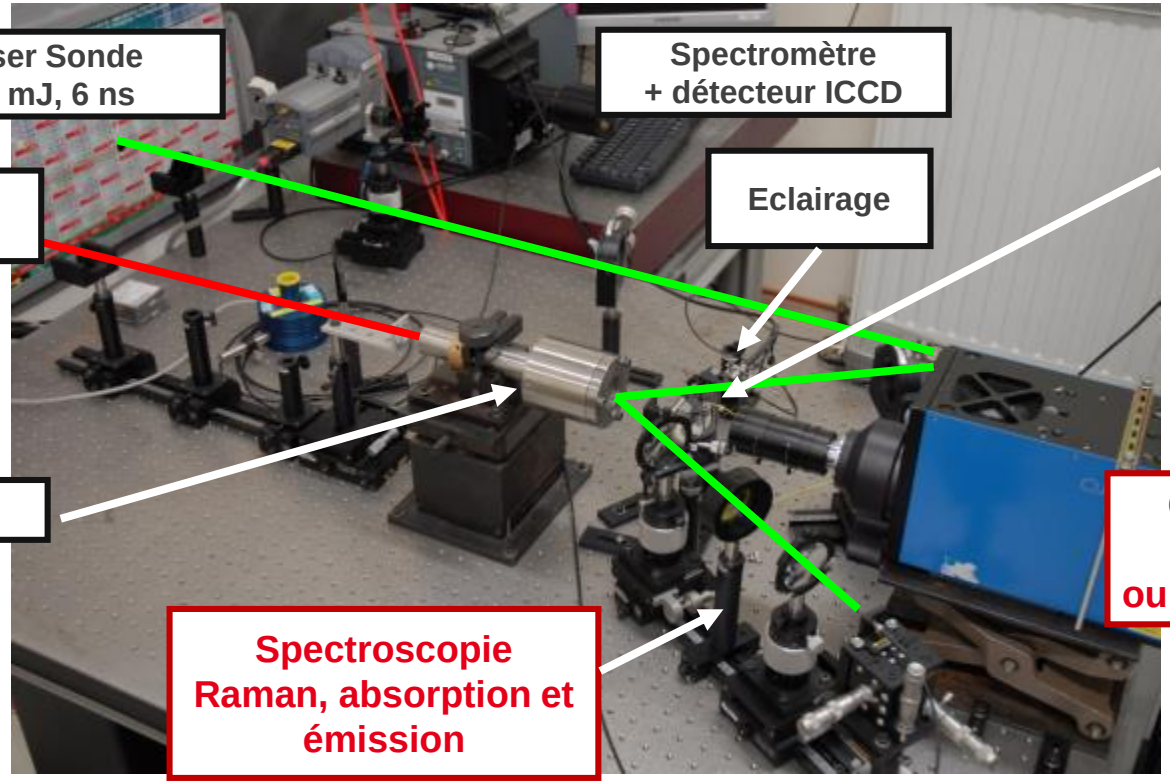
Modification du relais d'explosif
Insertion d'un gap d'air

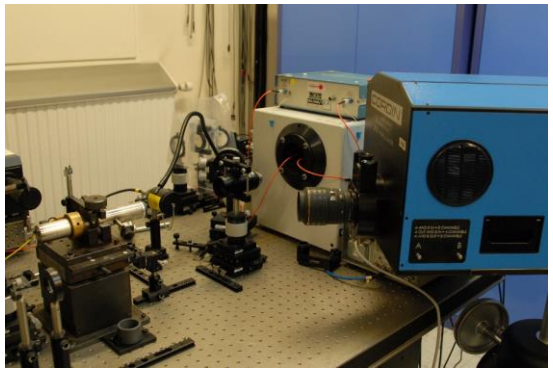




Génération de faibles pressions facilitée

Le GCOPY - Les diagnostics associés





Dispositif experimental pour l'étude du comportement sous choc des explosifs

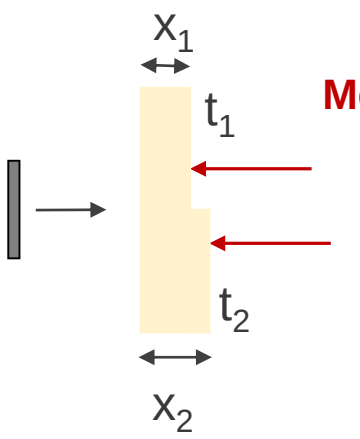
2. Exemples d’applications

1) Mesure d'Hugoniot de compositions explosives

Mesures de $D_{choc} = f(u_p)$ ou $P_{choc} = f(u_p)$

$D = c_0 + s\,u_p$ $\qquad$ $P = \rho_0 D u_p$

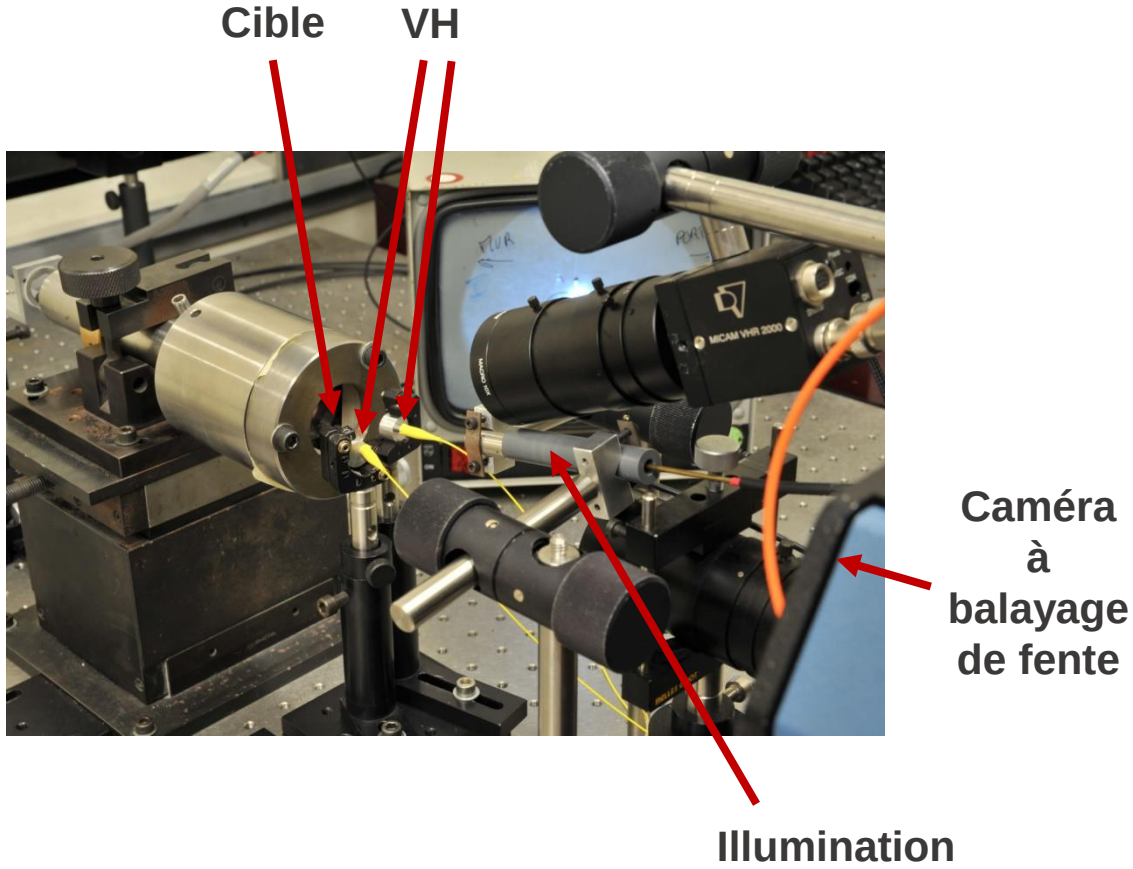
Impact sur une cible à marche (qq 10 µm)



Mesure VH

u_{fs1} $\qquad$ $u_p = u_{fs}/2$

u_{fs2} $\qquad$ $D = (x_2-x_1)/(t_2-t_1)$



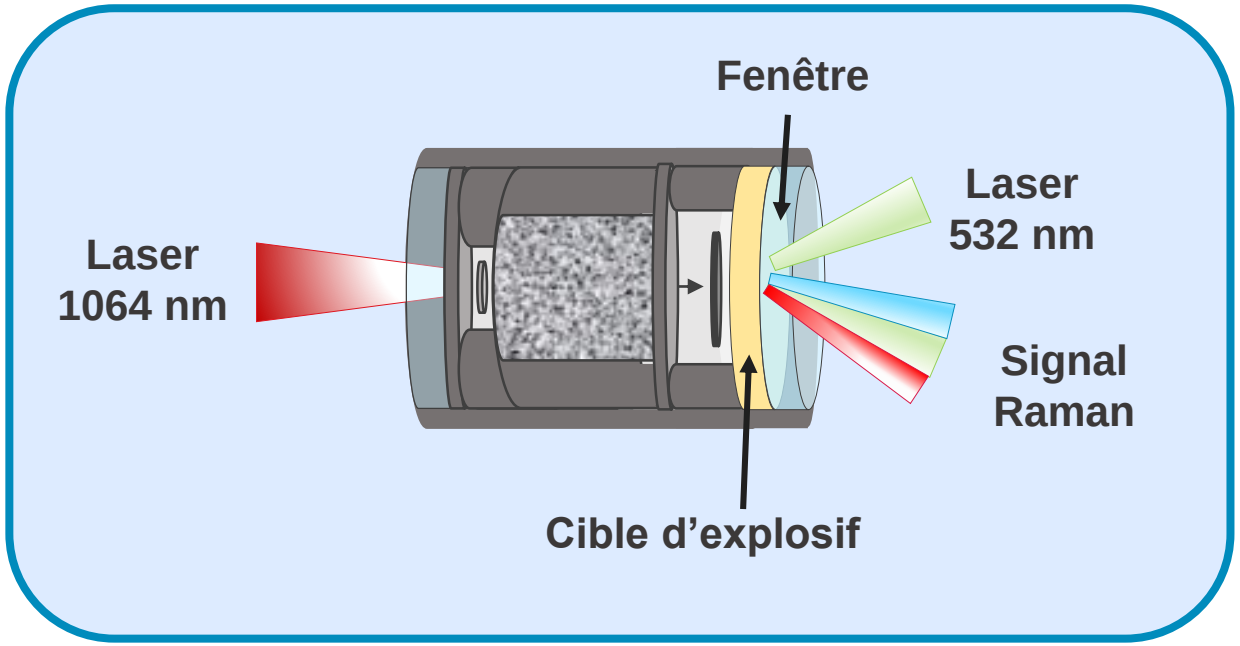
Un tir donne un point de l'Hugoniot

Expérience répétée pour différentes conditions de choc pour obtenir la courbe d'Hugoniot

Hébert et al., APS SCCM 2022

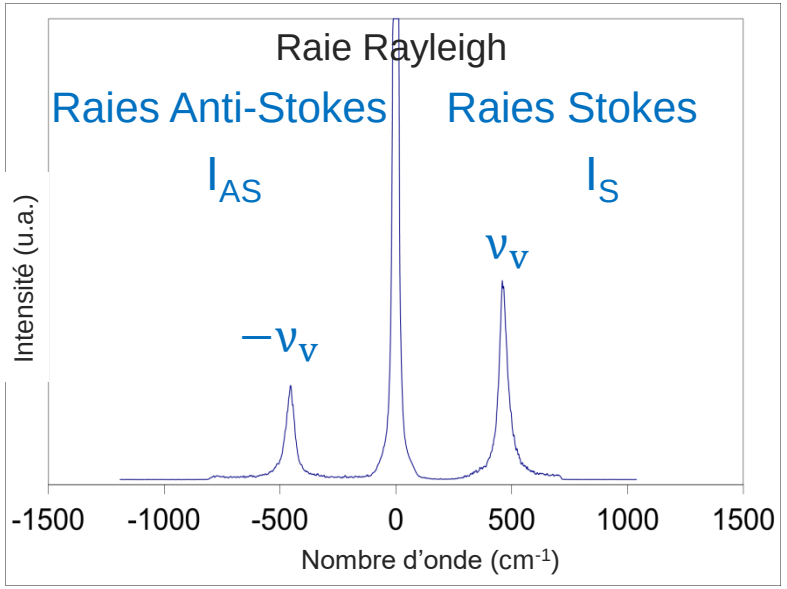
2) Mesure de température sous choc par spectroscopie Raman

Dispositif expérimental



Hébert et al., Proc. 16th Int. Det. Symposium-2018, pp 481-488

Spectroscopie Raman



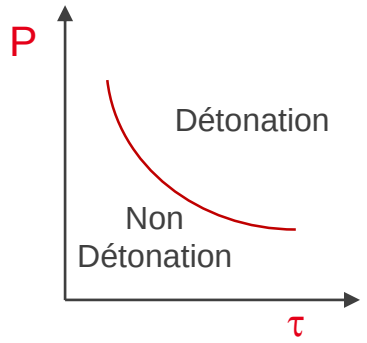
$$T = -\frac{hc\nu_v}{k_B}\frac{1}{\ln\left(\frac{I_{AS}}{I_S}\left(\frac{\nu_l-\nu_v}{\nu_l+\nu_v}\right)^4\right)}$$

Mesure de température directe d'explosifs sous choc inerte

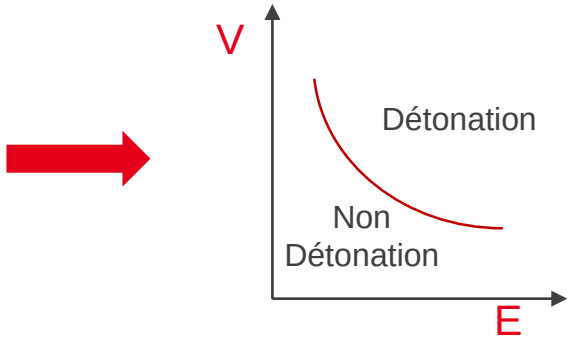
3) Etude de l'initiation par choc des explosifs

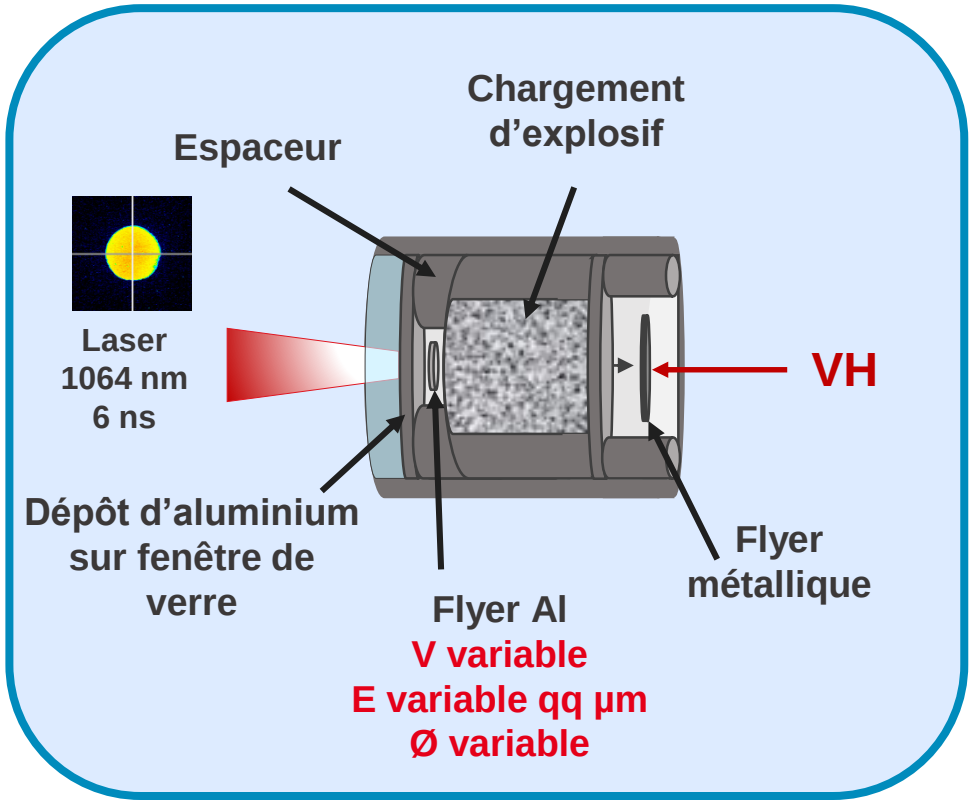
Détermination des conditions critiques d'amorçage des explosifs par chocs impulsionnels

- Pression = f(durée du choc) P(τ) pour différents diamètres de flyers



P dépend de la vitesse du flyer
τ dépend de l'épaisseur du flyer





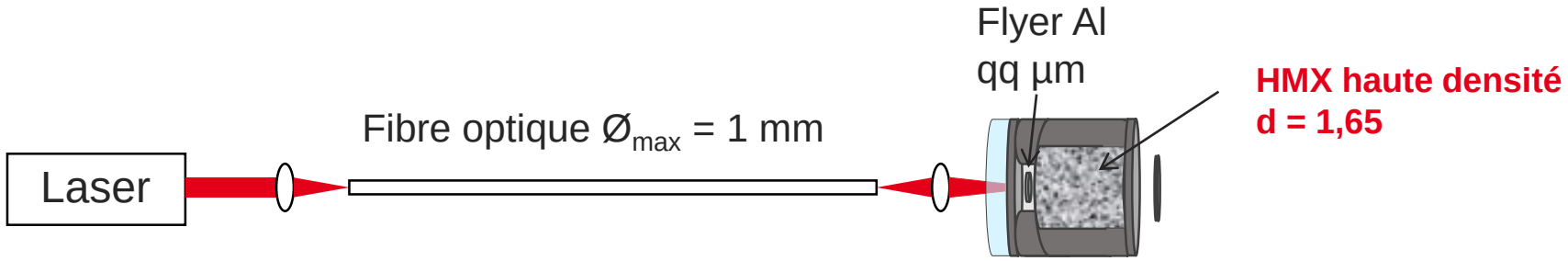
3. Détonateur optique fibré

Objectif

- Disposer d'un détonateur optique utilisable sur dalle de tir

  - Performances et fiabilité maximales ➡ HMX haute densité

  ➢ **Détonateur fibré** pour préserver la source laser de dommages potentiels



- **Difficulté principale** : faire passer l'énergie laser nécessaire à l'amorçage du HMX dans une fibre optique sans l'endommager et en obtenant un profil de faisceau homogène en sortie

La mise de feu

Laser disponible au laboratoire

Lumibird Ultra 50 1064 nm, 8 ns

Fibre L=10 m Ø = 1 mm

Ajout d'une seconde fibre consommable

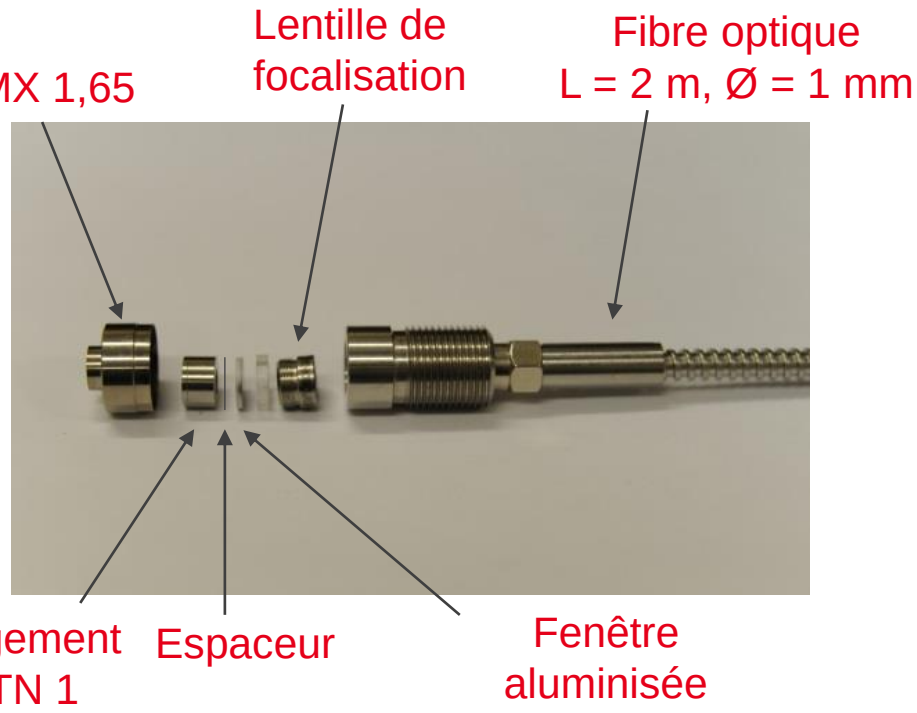
Energie en sortie = 40 mJ

- Seuil d'initiation du HMX d = 1,65 : E_{laser} ~ 40 mJ pour un flyer Al 7 µm avec Ø = 0,5 mm

→ Difficile d'amorcer directement du HMX d = 1,65 avec notre système fibré

Le détonateur optique fibré

Développement d'un détonateur optique bi-étage
PETN d = 1 pour initiation + HMX 1,65 pour les performances

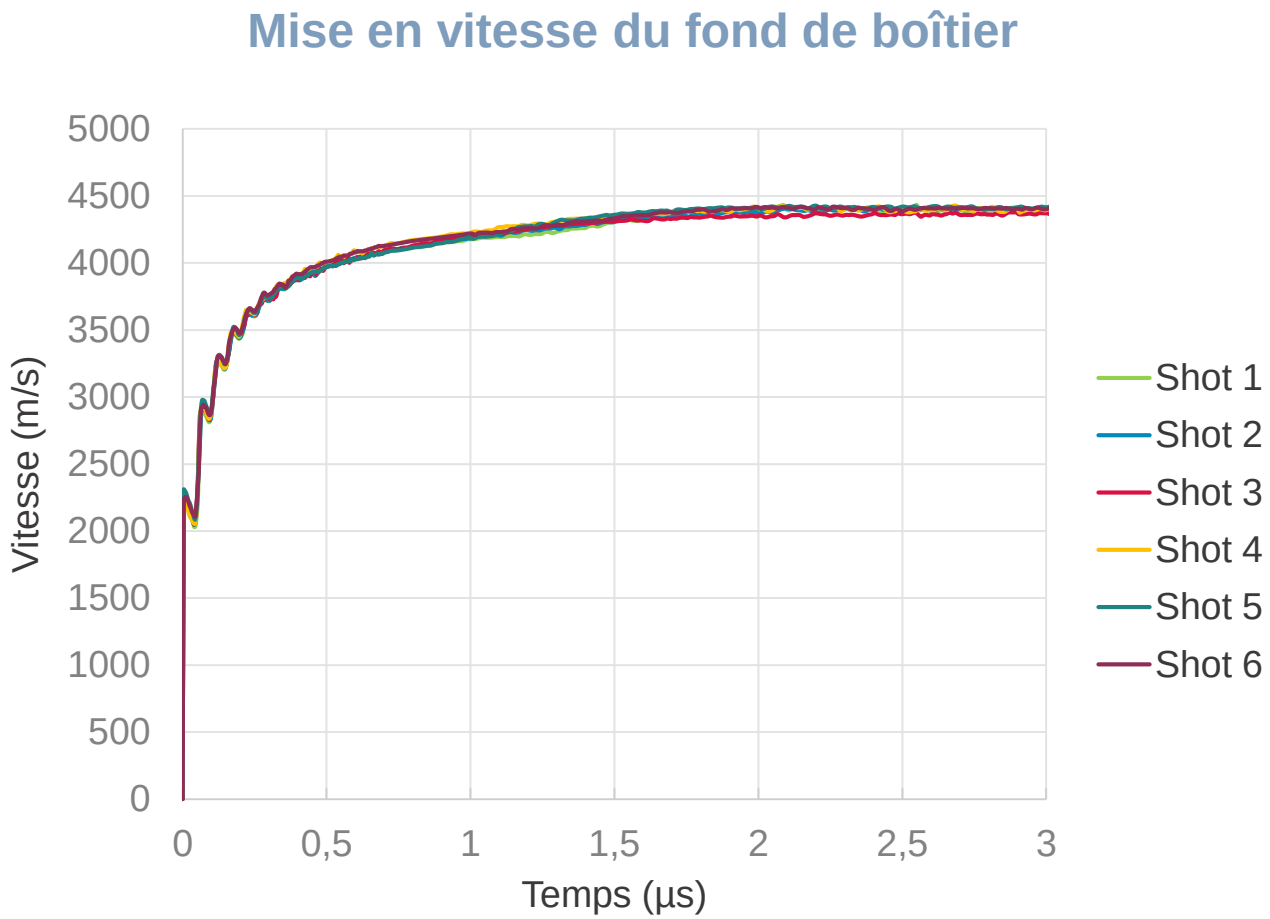


Energie laser disponible = 40 mJ

Energie minimale pour initier la PETN : 15 mJ

- Garantie de fiabilité

Détonateur optique fibré - Performances



Bonne reproductibilité
Vitesse terminale +/- 25 m/s

Conclusion

- **Nous avons développé un système d'amorçage optique pour l'étude du comportement sous choc des matériaux énergétiques (le GCOPY)**
  - C'est un slapper optique aérien

- **Différentes études peuvent être effectuées avec ce générateur :**
  - Mesures d'Hugoniot
  - Mesures de température sous choc par spectroscopie Raman
  - Etudes de l'amorçabilité des explosifs

- **Un détonateur fibré basé sur le même principe a également été développé**
  - Un système à 2 étages d'explosifs (PETN + HMX) est opérationnel
  - Il est performant et fiable
  - Un travail d'optimisation est en cours pour aboutir à un détonateur à un seul étage de HMX

Merci pour votre attention