



**HAL**  
open science

## Interrogation d'une Onde de Choc par Ondes Millimétriques

Benoit Rougier, Hervé Aubert, Alexandre Lefrançois, Jérôme Luc, Antoine  
Osmont

► **To cite this version:**

Benoit Rougier, Hervé Aubert, Alexandre Lefrançois, Jérôme Luc, Antoine Osmont. Interrogation d'une Onde de Choc par Ondes Millimétriques. Journées Nationales Microondes, May 2017, Saint Malo, France. 5p. hal-01593652

**HAL Id: hal-01593652**

**<https://laas.hal.science/hal-01593652>**

Submitted on 26 Sep 2017

**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.

# Interrogation d'une Onde de Choc par Ondes Millimétriques

B. Rougier<sup>1,2</sup>, H. Aubert<sup>2</sup>, A. Lefrançois<sup>1</sup>, J. Luc<sup>1</sup>, A. Osmont<sup>1</sup>

August 28, 2017

## Abstract

Dans cet article, nous proposons une méthode de détermination simultanée des vitesses d'un choc et du milieu mis en mouvement par interrogation électromagnétique dans la bande millimétrique.

## 1 Introduction

La détermination simultanée de la vitesse d'un choc et de celle du milieu mis en mouvement est nécessaire pour la détermination fiable des lois de comportement sous choc des matériaux solides. De nombreux matériaux énergétiques sont transparents dans la gamme de fréquence du gigahertz ; l'utilisation d'ondes millimétriques constitue donc une approche intéressante pour sonder un tel milieu. Pour mesurer ces vitesses, la connaissance de la permittivité diélectrique du milieu choqué est nécessaire.

Des auteurs ont proposé des méthodes pour mesurer simultanément les vitesses d'intérêt [1]. Ces approches présentent deux inconvénients majeurs : elles corrélient les données expérimentales aux calculs pour obtenir les vitesses ou nécessitent un modèle donnant l'évolution de la permittivité relative du matériau en fonction de la masse volumique du milieu, afin de pouvoir représenter le milieu choqué. Cependant, les modèles classiques de variation de la permittiv-

ité ne rendent pas compte de l'augmentation due à un choc [2]. Nous proposons ici une méthode qui permet de s'affranchir de ces limitations, basée sur l'effet Doppler et l'amplitude des signaux électromagnétiques de retour.

## 2 Modélisation électromagnétique

### 2.1 Description d'un essai et modélisation

Pour mesurer les vitesses d'intérêt, on réalise des expériences d'impact plan d'un projectile sur une cible. Afin de pouvoir obtenir des informations du milieu amont du choc, il est nécessaire de métalliser le projectile en face avant. On se place dans un cadre 1D, sans détente latérales dues au choc ou de divergence du faisceau micro-onde. Il est alors possible de représenter cette géométrie par un milieu continu, séparé en deux milieux : sain (*i. e.* au repos, noté 1) et sous choc (ou choqué, noté 2) comme le montre la figure 1. On note  $n$  l'indice de réfraction. Chaque interface est animée d'une vitesse  $V_i$ .

### 2.2 Mise en équations

On cherche à définir deux types de paramètres : les retours Doppler associés à chaque interface

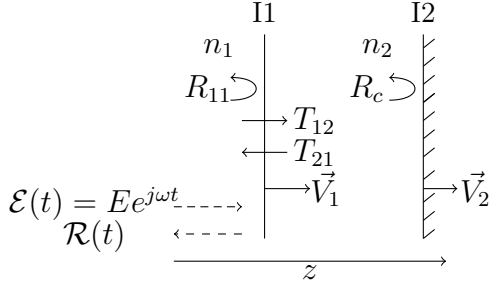


Figure 1: Milieu à deux couches pour l'interrogation par une onde électromagnétique  $\mathcal{E}(t)$

d'une part et l'amplitude de ces signaux d'autre part. On note le décalage en fréquence  $D_{R_{ii}}$  pour la réflexion sur l'interface  $i$  et  $D_{T_{ij}}$  pour la transmission de l'onde du milieu  $i$  au milieu  $j$ .

L'effet Doppler  $f_1$  associé à la première interface I1 est  $D_{R_{11}}$ . Le cas de la seconde interface I2 est plus complexe. L'onde émise est tout d'abord transmise par la première interface puis réfléchi sur le réflecteur parfait. Ensuite, cette onde est soit réfléchi sur l'interface I1, soit transmise. Il existe donc plusieurs retours Doppler associés à la seconde interface. Le principal, celui qui ne se réfléchit qu'une fois sur la seconde interface, décale la fréquence de l'onde incidente d'un facteur  $D_{T_{12}}D_{R_c}D_{T_{21}}$ . Ce décalage fréquentiel est noté  $f_2$ .

L'amplitude des signaux retour se calcule par le biais des formules de Fresnel [3] dans un cadre relativiste [4]. Les équations 1 et 2 donnent les coefficients de réflexion et de transmission considérés.

$$R_{11} = \frac{1 - n_1 \frac{V_1}{c}}{1 + n_1 \frac{V_1}{c}} \times \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (1)$$

$$T_{12} = \frac{1 - n_1 \frac{V_1}{c}}{1 - n_2 \frac{V_1}{c}} \times \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \quad (2)$$

## 2.3 Résolution

En utilisant les expressions précédentes, on peut former un système de trois équations à trois inconnues reliant les effets Doppler  $f_1$  et  $f_2$  et le rapport des amplitudes  $R_a$  des signaux associés à chaque interface aux vitesses et à l'indice de réfraction du second milieu. Ce rapport s'exprime par l'équation 3.

$$R_a = \frac{R_{11}}{T_{12}T_{21}R_{22}} \quad (3)$$

Comme les vitesses considérées sont faibles devant la vitesse de la lumière, les expressions sont développées au premier ordre. Les équations 4 à 6 décrivent le système, où  $f_c$  est la fréquence d'interrogation.

$$V_1 = \frac{c}{2n_1} \times \frac{f_1}{f_c} \quad (4)$$

$$V_2 = V_1 + \frac{c}{2n_2} \times \frac{f_1 - f_2}{f_c} \quad (5)$$

$$R_a n_1^2 + 4n_1 n_2 \left(1 - \frac{f_1 - f_2}{f_c}\right) - R_a n_2^2 = 0 \quad (6)$$

## 3 Confrontation expérimentale et résultats

### 3.1 Montage expérimental

On réalise un impact plan sur une composition énergétique à base de triaminotrinitrobenzene (TATB). Un projectile en cuivre est projeté, à l'aide d'un lanceur à poudre, sur une

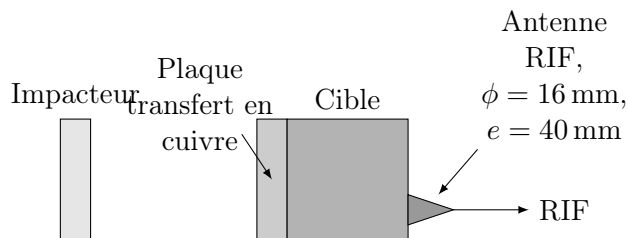


Figure 2: Montage expérimental d'impact plan avec plaque de transfert

plaque de cuivre collée à un échantillon. Un interféromètre à 94 GHz, identique à celui de Belkii *et al.* [5] est utilisé. L'onde réfléchie est captée par l'appareil, séparée en deux signaux qui sont ensuite mélangés et déphasés. On obtient donc en sortie deux signaux portant les mêmes informations en fréquence et en amplitude. L'ensemble de ce dispositif est décrit dans [6] et schématisé sur la figure 2. La vitesse du projectile à l'impact est  $798 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 3.2 Résultats expérimentaux et discussion

Les signaux expérimentaux obtenus sont présentés en figure 3. Deux composantes fréquentielles sont visibles pour chaque voie de mesure. On détermine ces fréquences par transformée de Fourier et on calcule le rapport d'amplitude  $R_a = A_2/A_1$  par une corrélation de la forme  $A + A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$ , en ajustant les paramètres  $A$ ;  $A_1$ ;  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$ . L'amplitude de l'oscillation de fréquence basse diminue avec le temps, on réalise donc trois corrélations en choisissant à chaque fois une période du signal de faible fréquence différente. Le tableau 1 présente les valeurs obtenues.

On applique alors les équations 4 à 6 pour obtenir  $V_1$ ,  $V_2$  et  $n_2$ , en prenant  $n_1 = 2,13$  [6].

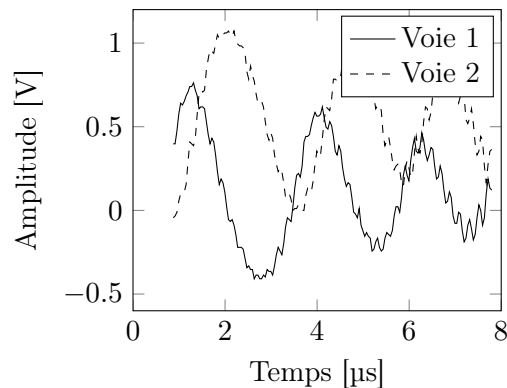


Figure 3: Signaux de radio-interférométrie

Table 1: Paramètres d'entrée du modèle calculés à partir des résultats expérimentaux

Période	Voie	$f_1$ (MHz)	$f_2$ (kHz)	$R_a$
1	1	5,17	396	15,1
	2	5,17	357	20,8
2	1	5,09	400	10,4
	2	5,07	373	10,5
3	1	4,98	529	4,4
	2	4,96	438	4,1

Le tableau 2 présente les résultats expérimentaux comparés aux vitesses obtenues avec un code de calcul 1D.

Les résultats obtenus sont très différents en fonction de la période choisie. Lefrançois *et al.* [6] montrent, en mesurant la pression au cours du temps et en la comparant à des résultats de simulations hydrodynamiques inertes ou réactives, qu'un début de réaction est présent. Selon plusieurs auteurs [7] [8], l'apparition de points chauds dans la matière et donc l'initiation d'une réaction conduisent à une augmentation de l'absorption micro-onde dans l'échantillon. Le signal réfléchi sur l'impacteur métallique est donc

Table 2: Résultats en vitesse du modèle et comparaison avec la littérature

Période	Voie	$V_1$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$V_2$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Indice de réfraction	Écart (%)	$V_1$	Écart (%)	$V_2$
1	1	3869	738	2,43	-0,1		11	
	2	3865	596	2,34	-1,8		10	
2	1	3831	915	2,57	-1,1		38	
	2	3815	890	2,56	-1,5		34	
3	1	3749	1592	3,29	-3		140	
	2	3730	1605	3,40	-3,7		142	

fortement absorbé pour les périodes 2 et 3. Le modèle développé n'est pas applicable dans ce cas.

Pour la première période, les résultats obtenus pour la vitesse du choc sont très proches de ceux calculés avec 1,8 % d'écart au maximum. L'écart entre le calcul et la modélisation de la vitesse sous choc se situe entre -10,1 % et 11,3 %. La variation de  $n_2$  par rapport à  $n_1$  est de l'ordre de 14 %.

On peut noter que l'erreur absolue maximale sur la vitesse du choc est de 3,7%. Ce paramètre n'est pas influencé par la zone d'absorption puisque la réflexion se produit sur le front de compression. De plus, on observe une décroissance de la vitesse qui peut s'expliquer par le fait que le cône d'émission de l'interféromètre n'est pas centré sur l'échantillon. Cette mesure est donc cohérente avec la propagation d'ondes de détente latérales dans l'échantillon.

La valeur de la permittivité pour la première période peut être comparée aux modèles expérimentaux de Gladstone Dale, Clausius Mossotti et Lorenz-Lorentz [2]. Le tableau 3 présente les valeurs et les écarts observés par rapport à ces modèles. La permittivité calculée par le modèle de Lorenz-Lorentz est entre les valeurs obtenues pour chaque voie. Cette approche semble donc

la plus adaptée pour ce cas d'étude.

Table 3: Permittivité mesurée comparée aux modèles sous choc

Méthode	Permittivité	Écart voie 1
Mesure voie 1	2,43	0 %
Mesure voie 2	2,34	-3,7 %
Gladstone Dale	2,6	7,0 %
Clausius Mossotti	2,3	-5,3 %
Lorenz-Lorentz	2,37	-2,5 %

## 4 Conclusion

Cet article propose une nouvelle méthode analytique de détermination de la vitesse d'un choc et de celle du milieu mis en mouvement par l'étude de la propagation des ondes électromagnétiques qui permet de s'affranchir de la modélisation de la permittivité du milieu choqué ou d'une corrélation avec un large nombre de paramètres. Cette modélisation électromagnétique est confrontée à un calcul 1D hydrodynamique dans une

configuration d'impact plan sur un matériau énergétique. Les valeurs obtenues concordent et montrent la pertinence de cette approche.

Des expérimentations d'impact avec des matériaux inertes permettraient de valider l'hypothèse d'extinction par la zone de réaction. Si dans un tel cas une diminution du signal était visible, il faudrait alors ajouter une étude de l'absorption dans les matériaux.

## References

- [1] A. D. Krall, B. C. Glancy, and H. W. Sandusky, "Microwave interferometry of shock waves. I. Unreacting porous media," *Journal of Applied Physics*, vol. 74, no. 10, pp. 6322–6327, 1993.
- [2] R. Hawke, R. Keeler, and A. Mitchell, "Microwave dielectric constant of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at 375 kilobars," *Applied Physics Letters*, vol. 14, no. 7, pp. 229–231, 1969.
- [3] Z. Ma and S. Okamura, "Permittivity determination using amplitudes of transmission and reflection coefficients at microwave frequency," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 5, pp. 546–550, 1999.
- [4] S. Orfanidis, *Electromagnetic Waves and Antennas*. Rutgers University Press, 2016.
- [5] V. M. Belskii, A. L. Mikhailov, A. V. Radionov, and A. A. Sedov, "Microwave diagnostics of shock-wave and detonation processes," *Combustion, Explosion and Shock Waves*, vol. 47, no. 8, pp. 639–650, 2011.
- [6] A. Lefrançois, E. Bouton, L. Jacquet, V. Chuzeville, J. Peix, J. Luc, G. Baudin, M. Genetier, P. Mateille, G. Zaniolo, A. Osmond, and M. Debruyne, "Low amplitude shock initiation experiments on TATB based composition tested with inverse particle velocity," in *Europyro*, 2015.
- [7] B. Glancy, H. Sandusky, and A. Krall, "Microwave interferometry of shock wave. II. Reacting porous media," *Journal of Applied Physics*, vol. 74, pp. 6328–6334, 1993.
- [8] V. Ogorodnikov, A. M. M. Peshkov, E. Bogdanov, A. R. R. Sedov, A. Fedorov, D. Nazarov, S. Finyushin, V. Dudoladov, S. Erunov, and A. Blikov, "On the effect of conductivity of a shock-compressed gas on interferometric recording of parameters of motion of a liner," *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol. 114, pp. 161–166, 2012.