



**HAL**  
open science

## Détection d'ultrasons par interférométrie adaptative dans des cristaux photoréfractifs

Alain Blouin, Philippe Delaye, Jean-Pierre Monchalin, Gérald Roosen

► **To cite this version:**

Alain Blouin, Philippe Delaye, Jean-Pierre Monchalin, Gérald Roosen. Détection d'ultrasons par interférométrie adaptative dans des cristaux photoréfractifs. *Instrumentation, Mesure, Métrologie*, 2001, 1, pp.127-141. hal-00674000v2

**HAL Id: hal-00674000**

**<https://iogs.hal.science/hal-00674000v2>**

Submitted on 30 Mar 2012

**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.

# Détection d'ultrasons par interférométrie adaptative dans des cristaux photoréfractifs

**Alain Blouin\*, Philippe Delaye\*\*, Jean-Pierre Monchalin\* et**

**Gérald Roosen\*\***

*\*Institut des matériaux industriels, Conseil national de recherches du Canada, 75, de Mortagne, Boucherville, Québec, Canada, J4B 6Y4.  
alain.blouin@nrc.ca, jean-pierre.monchalin@nrc.ca*

*\*\*Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique Théorique et Appliquée, Unité Mixte de Recherche 8501 du Centre National de la Recherche Scientifique, Bat. 503, Centre Scientifique d'Orsay, B.P. 147, 91403 Orsay Cedex, France.  
philippe.delaye@iota.u-psud.fr, gerald.roosen@iota.u-psud.fr*

*RÉSUMÉ. Les ultrasons sont à la base d'une technique non destructive puissante couramment utilisée dans l'industrie pour mesurer des épaisseurs, détecter des défauts et caractériser des matériaux. Ils nécessitent cependant un contact ou un couplage par fluide et des géométries bien définies. Quand ceci n'est pas le cas (hautes températures, géométries complexes ou mal définies), la technique des ultrasons générés et détectés par laser offre une solution pratique intéressante et souvent unique. Les difficultés rencontrées par la détection et causées en particulier par la rugosité des surfaces industrielles a traditionnellement été un obstacle à l'utilisation de cette technique. Bien que des solutions de type passif aient été apportées (interféromètre de Fabry-Perot confocal), l'interférométrie adaptative basée sur le mélange deux-ondes dans des cristaux photoréfractifs offre une solution des plus puissantes. Nous décrivons dans cet article le système développé, ses avantages par rapport au Fabry-Perot confocal et les approches utilisées pour optimiser sa sensibilité et son usage pratique, lesquelles ont permis sa commercialisation.*

*ABSTRACT. Ultrasonic-based nondestructive techniques are powerful industrial tools for thickness measurements, detection of defects and materials characterization. However, ultrasonic techniques require either a contact with the material or a liquid couplant to transmit ultrasound in the material. This drawback forbids the applications of ultrasonics to materials at high temperature or materials with a complex geometry. Laser-ultrasonics is a non-contact technique that uses lasers for generation and detection of ultrasound. The surface roughness of the industrial surfaces represents a challenge for the detection of ultrasound by interferometric methods. Although passive solutions based on a confocal Fabry-Perot already exist, adaptive interferometry based on two-wave mixing in photorefractive crystals is a new and simple emerging powerful technique. We described in this paper the advantages of this new technique compared to the confocal Fabry-Perot-based techniques. We present also the different approaches devised for maximizing the sensitivity*

*and the practical use of the two-wave mixing-based adaptive interferometer for ultrasound detection, which have led to its commercialization.*

*MOTS-CLÉS :ultrasons-laser, dispositif photoréfractif, interféromètre adaptatif*

*KEY WORDS :Laser-ultrasonics, photorefractive device, adaptive interferometry*

## **1. Introduction**

On assiste actuellement à un développement important de nouveaux moyens optiques pour l'industrie. L'optique a l'avantage d'opérer à distance, sans contact avec les produits ou matériaux sous évaluation, mais ne peut cependant pas sonder directement l'intérieur de matériaux opaques à la lumière, lesquels représentent en fait la plupart des matériaux industriels. Les ultrasons au contraire permettent l'inspection sous la surface des matériaux et conduisent ainsi à la mesure des propriétés élastiques et à la microstructure des matériaux, lesquelles conditionnent leurs propriétés de déformation et de rupture.

Le principe du laser-ultrason (aussi appelé ultrason-laser) consiste à utiliser un laser impulsif pour générer les ultrasons et un second laser couplé à un interféromètre pour les détecter [SCR 90]. La génération d'ultrasons peut d'abord se faire par un mécanisme thermoélastique qui n'affecte pas le matériau. Ce mécanisme consiste en l'échauffement d'une couche superficielle, plus ou moins épaisse selon la pénétration lumineuse, suivie de la dilatation de cette couche et de la création, au voisinage de la surface, de déformations et de forces qui sont à la source des ondes ultrasonores. Des ondes longitudinales, de cisaillement ou de surface (ou de plaque) sont en général générées [SCR 90, HUT 88]. Un cas particulièrement important se produit dans les polymères et matériaux à matrice polymère avec l'utilisation d'un laser infrarouge (tel que le laser CO<sub>2</sub> TEA). Dans ce cas, on a une absorption distribuée et l'émission forte d'une onde longitudinale normale à la surface (pour une tache sur la surface non ponctuelle). Lorsque la densité d'énergie à la surface excède le seuil d'ablation, il y a un effet de recul de la matière éjectée, qui conduit aussi à l'émission d'une onde longitudinale forte normale à la surface. Ce régime est utilisé quand l'état de surface du matériau n'est pas critique ou bien à haute température, l'ablation ne produisant dans ce cas que l'arrachement de l'oxyde superficiel, lequel est souvent régénéré rapidement. Quand le laser vaporise une faible couche de contaminant à la surface du matériau (par exemple, de l'huile) sans affecter le substrat lui-même, il y a aussi une émission importante normale à la surface.

La détection optique des ultrasons s'effectue à l'aide d'un second laser, très stable (i.e. généralement monomode longitudinal), qui est modulé en phase ou en fréquence par le mouvement de la surface produit par les ondes ultrasonores. La lumière diffusée par la surface est par la suite collectée et transmise à un dispositif

visant à démoduler la phase. Les déplacements ultrasonores de surface à détecter sont très petits (de l'ordre du nanomètre ou de l'angström), ce qui nécessite une technique très sensible basée sur l'interférométrie. Ces déplacements sont cependant à des fréquences bien supérieures à celles des vibrations mécaniques ambiantes, ce qui permet de les détecter pour autant que l'interféromètre n'est pas sensible ou s'adapte à ces perturbations ambiantes. La plupart des matériaux rencontrés en industrie ont des surfaces optiquement rugueuses et la lumière diffusée par ces surfaces présente des tavelures. Un interféromètre insensible aux tavelures est donc préférable pour la détection des ultrasons, bien que des systèmes sensibles aux tavelures, basés en particulier sur l'interférométrie hétérodyne soient appropriés à des travaux menés en laboratoire [MON 86]. Pour qu'un interféromètre soit insensible aux tavelures, il doit avoir une grande étendue. L'interféromètre de Fabry-Perot confocal, utilisé en transmission ou réflexion, proposé il y a plusieurs années est désormais un moyen bien accepté [MON 86a, MON 89]. L'interféromètre fonctionne comme un filtre optique qui démodule la modulation de fréquence ou de phase présente dans la lumière diffusée.

Une autre approche permettant l'insensibilité aux tavelures est basée sur l'holographie en temps réel dans des cristaux photoréfractifs. Plusieurs approches ont été proposées dont le mélange à deux ondes [ING 91, BLO 94], la double conjugaison de phase [DEL 95a], l'auto-modulation de la polarisation [KAM 00] ou utilisant la force photo-électro-motrice transitoire [PET 90]. On réalise ainsi un interféromètre adaptatif qui s'adapte aux tavelures et aux perturbations ambiantes. Nous décrivons dans cet article, les caractéristiques d'un interféromètre adaptatif pour la mesure des ultrasons basé sur le mélange à deux ondes dans un cristal photoréfractif et donnerons quelques exemples d'applications de ce capteur. Nous comparons aussi ses performances à celles du Fabry-Perot confocal.

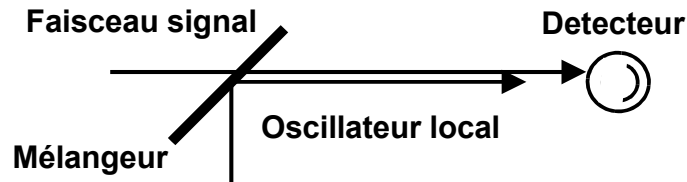
## 2. Caractéristiques requises d'un capteur optique d'ultrasons

La détectivité est le plus petit déplacement de surface ultrasonore pouvant être mesuré par le capteur par unité de bande passante. Ce plus petit déplacement est obtenu pour un rapport signal-à-bruit de 1. Pour les capteurs optiques d'ultrasons, cette détectivité dépend aussi de la quantité de lumière collectée de la cible. Pour des puissances collectées raisonnables, les capteurs optiques d'ultrasons sont beaucoup moins sensibles que les transducteurs piézo-électriques [BOL 95]. La sensibilité ultime d'un capteur optique d'ultrasons est obtenue pour une configuration homodyne simple, telle que décrite à la figure 1. On suppose ici que les faisceaux ont des fronts d'onde plan et que le bruit de photon est la source de bruit dominante.

En supposant une bande passante électronique de 1 Hz et une puissance laser collectée de la cible de 1 W afin de comparer différents systèmes, le plus petit déplacement de surface pouvant être mesuré s'écrit :

$$\delta_{\text{lim}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{hv}{2\eta}} \quad [1]$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde optique,  $h$  la constante de Planck,  $\nu$  la fréquence optique de l'onde de détection et  $\eta$  l'efficacité quantique du photodétecteur.



**Figure 1.** Schéma de la configuration homodyne.

Cette limite de détection est la valeur ultime prévue par la théorie classique i.e. pour des états cohérents de la lumière livrés par les lasers. On peut espérer, en principe, dépasser cette limite en utilisant des états comprimés ou d'autres états non-classiques de la lumière [CAV 81]. Un capteur optique d'ultrasons se doit évidemment d'avoir une détectivité la plus proche possible de la limite ultime.

La deuxième caractéristique importante du capteur est sa capacité à s'adapter aux fluctuations spatiales et temporelles de la lumière diffusée par les surfaces des matériaux inspectés. Ces surfaces sont en général optiquement rugueuses et diffusent une lumière ayant un front d'onde formé de plusieurs tavelures auquel le capteur doit s'adapter. Cette capacité d'adaptation est caractérisée par l'étendue du capteur, définie par le produit de la surface illuminée de l'objet inspecté et de l'angle solide sous-tendu par le système optique de collection de la lumière. La plupart des systèmes existant, de type homodyne ou hétérodyne, fonctionne avec des ondes planes ou en ne collectant qu'une seule tavelure [MON 86]. Leur étendue est donc limitée à environ  $\lambda^2$ , conformément au théorème de l'antenne, ce qui correspond à  $10^{-6} \text{ mm}^2 \cdot \text{sr}$  pour une longueur d'onde de  $1 \mu\text{m}$ . Pour l'inspection de surfaces rugueuses, on peut utiliser ces dispositifs de faible étendue en limitant l'ouverture de la pupille de collection entraînant ainsi une très faible quantité de lumière collectée et un capteur de faible sensibilité. Une seconde approche consiste à focaliser le faisceau laser sur la surface à inspecter de manière à augmenter la taille des tavelures et à ne collecter qu'une seule de ces tavelures. Cette seconde solution, habituellement préférée en pratique, souffre d'une petite profondeur de champ et d'une quantité de lumière variant fortement d'un point à l'autre de la surface suite à la brillance aléatoire des tavelures.

Des modifications pour accroître l'étendue d'interféromètres de type Michelson ou Mach-Zehnder ont été proposées pour la détection d'ultrasons [MON 86]. Toutefois, en pratique, l'utilisation d'un interféromètre Fabry-Pérot confocal, multi-passages et de large étendue, s'avère beaucoup plus profitable, ce qui fait que ce type d'interféromètre est maintenant implanté dans l'industrie. L'étendue requise pour un capteur optique d'ultrasons doit typiquement

correspondre à celle d'une fibre optique multimode à large coeur utilisé pour transmettre simplement et avec flexibilité la lumière de la surface à inspecter au capteur. Par exemple, une fibre de 1 mm de coeur et d'une ouverture numérique de 0.39 a une étendue de  $0.4 \text{ mm}^2 \cdot \text{sr}$ , ce qui est supérieur de cinq ordres de grandeur à l'étendue des capteurs limitée par le théorème de l'antenne. L'utilisation d'un dispositif à large étendue permet de travailler avec de l'optique de faible qualité et à bas coût puisque le système n'est pas sensible aux aberrations et aux distorsions de phase du front d'onde.

L'adaptabilité aux fluctuations temporelles signifie que le capteur s'adapte ou compense les vibrations mécaniques ambiantes. Le spectre de fréquences de ces vibrations est habituellement inférieur à 10 kHz. Le capteur devrait donc avoir un temps de réponse aux changements de l'ordre de 10  $\mu\text{s}$  afin de ne pas être sensible à ces basses fréquences. De plus, compte tenu des épaisseurs des matériaux inspectés, la mesure des échos ultrasonores dure typiquement quelques dizaines de  $\mu\text{s}$ . Il est donc avantageux de faire cette mesure à l'aide d'un laser générant des impulsions de quelques dizaines de  $\mu\text{s}$ , plus puissant qu'un laser continu, afin de récolter une plus grande puissance lumineuse de la surface et ainsi accroître la sensibilité. L'utilisation d'un tel laser requiert aussi un temps de réponse du capteur inférieur à la durée de l'impulsion de détection i.e. à nouveau de quelques  $\mu\text{s}$ . Finalement, l'utilisation de ce capteur pour l'inspection de surfaces en mouvement, selon l'axe optique ou perpendiculaire à cet axe, ou pour l'inspection avec un laser qui balaie la surface, peut demander un temps de réponse plus court que la dizaine de  $\mu\text{s}$ , typiquement de quelques centaines de ns. Ces courts temps de réponse sont aisément obtenus avec un interféromètre de Fabry-Perot confocal. En contrepartie, le capteur est d'autant moins sensible aux basses fréquences ultrasonores de l'ordre du MHz qu'il est rapide. En résumé, en fonction de l'application visée, un capteur devrait avoir une fréquence de coupure d'environ 10 kHz à 1 MHz i.e. un temps de réponse de 100 ns à 10  $\mu\text{s}$ . Idéalement, un temps de réponse ajustable en fonction de l'application serait un atout.

Une autre caractéristique requise pour le capteur est une large bande passante, s'étendant jusqu'à la centaine de MHz ou plus. Il est à noter que cette large bande de mesure est un avantage de la détection optique d'ultrasons par rapport aux capteurs piézo-électriques. Il serait aussi préférable que le dispositif ait une réponse en fréquence plate, ce qui permet d'obtenir un signal dénué de distorsions et reflétant le mouvement ultrasonore de la surface.

Nous avons présenté les principales caractéristiques attendues d'un capteur optique d'ultrasons. Nous utiliserons ces caractéristiques pour comparer divers capteurs. D'une moindre importance, ajoutons la robustesse, la facilité d'utilisation et une taille et un poids raisonnable. Un capteur muni d'un système de détection différentielle serait aussi avantageux pour éliminer les fluctuations d'amplitude du laser ou l'enveloppe du laser impulsionnel.

### 3. Interféromètre adaptatif par mélange à deux ondes

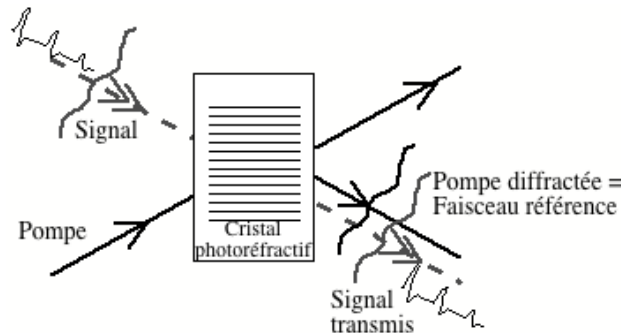
L'interféromètre adaptatif basé sur le mélange à deux ondes a été initialement proposé et testé dans un cristal photoréfractif de  $\text{BaTiO}_3$  [ING 91]. Le temps d'écriture de l'hologramme dans ce cristal, typiquement de l'ordre de la seconde, ne permet pas au dispositif de s'adapter aux vibrations ambiantes, même dans un environnement de laboratoire. La sensibilité de l'interféromètre s'en trouve réduite et fluctuante. L'interféromètre a par la suite été testé et analysé, dans les configurations isotropes et anisotropes, avec un cristal de GaAs semi-conducteur [BLO 94]. Les temps d'écriture obtenus sont de l'ordre de quelques dizaines de  $\mu\text{s}$ , ce qui est suffisant pour permettre à l'interféromètre de s'adapter aux vibrations ambiantes. Le dispositif a par la suite été développé dans des cristaux semi-conducteurs d'InP:Fe mis sous haute tension, afin d'obtenir une sensibilité égale ou supérieure au Fabry-Perot et un temps de réponse suffisamment court pour être utilisable avec un laser de détection impulsionnel (durée typique de l'impulsion  $50\mu\text{s}$ ), lequel permet grâce à sa puissance une sensibilité accrue de la technique [DEL 97, BLO 98]. Ces cristaux photoréfractifs semi-conducteurs peuvent être opérés à la longueur d'onde proche infra-rouge de  $1.064\ \mu\text{m}$ , bénéficiant ainsi des sources lasers puissantes et très stables, disponibles commercialement à base de Nd:YAG. D'autres gammes de longueur d'onde depuis le visible jusqu'à la longueur d'onde de sécurité oculaire de  $1.5\mu\text{m}$  sont aussi accessibles, avec les mêmes cristaux semi-conducteurs ou des cristaux de la famille des sillénites pour le visible, avec les mêmes propriétés et des performances similaires.

Ces interféromètres adaptatifs sont particulièrement intéressants pour détecter les basses fréquences ultrasonores (en deçà de 2 MHz), seules à être transmises dans les pièces épaisses ou les matériaux très atténuants. Ils sont de plus compacts et peuvent être munis d'un détecteur différentiel qui permet d'éliminer les fluctuations d'intensité du laser et l'enveloppe du laser impulsionnel.

#### 3.1. Principe de fonctionnement

Une lame séparatrice à la sortie du laser est utilisée pour créer une onde signal et une onde pompe. L'onde signal est projetée sur la surface à inspecter où elle acquiert une modulation de sa phase à la fréquence des vibrations ultrasonores ainsi qu'une distorsion spatiale de son front d'onde suite à la rugosité de surface. La lumière diffusée par la surface est par la suite collectée par un système optique et mélangée au faisceau pompe à l'intérieur du cristal photoréfractif. Le schéma de principe de ce capteur est présenté à la figure 2. Les deux faisceaux interfèrent et écrivent un hologramme dynamique dans le cristal. A la sortie du cristal, on retrouve l'onde signal transmise par le cristal ainsi que l'onde pompe diffractée par l'hologramme. De par les propriétés de l'holographie, l'onde pompe diffractée a un front d'onde qui est la réplique exacte du front d'onde de l'onde signal. De plus, le temps d'écriture du réseau étant long devant la période des ondes ultrasonores,

l'onde pompe est diffractée par un réseau fixe et est dénuée de la modulation de phase associée à l'onde ultrasonore. L'onde pompe diffractée agit donc comme l'onde de référence ou l'oscillateur local de l'interféromètre homodyne ainsi formé. Les deux ondes interfèrent par la suite sur un photodétecteur afin de transformer la modulation de phase en modulation d'un signal électrique.



**Figure 2.** Principe de fonctionnement du capteur optique d'ultrasons par mélange à deux ondes dans un cristal photoréfractif.

Puisque les deux faisceaux ont des fronts d'onde adaptés, l'interféromètre est doté d'une grande étendue. De plus, le capteur ne requiert pas de stabilisation externe puisque l'hologramme est constamment réécrit et s'adapte aux changements basses fréquences de l'onde signal. Plus précisément, le capteur agit comme un filtre passe-haut, coupant les vibrations de basses fréquences et détectant les vibrations aux fréquences ultrasonores. La fréquence de coupure est donnée par le temps de réponse du milieu holographique, qui dans le cas des matériaux photoréfractifs est inversement proportionnel à la densité de puissance incidente (avec aussi une dépendance mineure avec le champ électrique appliquée au cristal).

### 3.2. Modèle théorique

Le dispositif peut être décrit par un modèle simple. Soit deux ondes de même polarisation, une onde pompe et une onde signal de beaucoup plus faible amplitude, qui écrivent un réseau ou un hologramme dans un cristal photoréfractif. Cet hologramme est un réseau d'indice caractérisé par un gain photoréfractif complexe  $\gamma = \gamma' + i\gamma''$ , dont les parties réelles et imaginaires représentent les composantes du réseau d'indice respectivement en quadrature et en phase avec la structure d'illumination qui a créé l'hologramme. Supposons une modulation de phase dont la fréquence est grande devant la fréquence de coupure basse du capteur et qui possède une faible amplitude de modulation ( $\varphi(t) \ll \pi/2$ ), le champ à la sortie d'un cristal d'épaisseur  $d$  et d'absorption  $\alpha$  s'écrit : [DEL 95]



$$E_d(d, t) = e^{-\frac{\alpha d}{2}} E_d(0, 0) \left[ (e^{\gamma d} - 1) + e^{i\varphi(t)} \right] \quad [2]$$

Le premier terme représente l'amplitude de l'onde diffractée i.e l'oscillateur local, et le second terme est associé à l'onde transmise. De cette expression, nous obtenons l'intensité incidente sur le détecteur :

$$I_d(d, t) = e^{-\alpha d} I_{d0} \left[ e^{2\gamma d} + 2e^{\gamma d} \sin(\gamma' d) \varphi(t) \right] \quad [3]$$

où  $I_{d0}$  est l'intensité incidente sur le capteur. Cette expression indique tout d'abord que la détection d'une modulation de phase nécessite que la partie imaginaire du gain photoréfractif soit non nulle i.e. que la composante de l'hologramme en phase avec la figure d'illumination soit non nulle, ce qui est l'équivalent de la mise en quadrature du signal et de l'oscillateur local dans une détection homodyne classique. Deuxièmement, nous déduisons de cette expression que l'efficacité de démodulation ne dépend pas du rapport des intensités pompe et signal. En conséquence, le temps de réponse du capteur peut être contrôlé en variant l'intensité pompe, sans incidence sur la détectivité du capteur.

De l'équation 3, on obtient que la limite de détection du capteur s'écrit :

$$\delta = \delta_{\text{lim}} \delta_{\text{rel}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{h\nu}{2\eta}} \frac{e^{\alpha d/2}}{\sin \gamma' d} \quad [4]$$

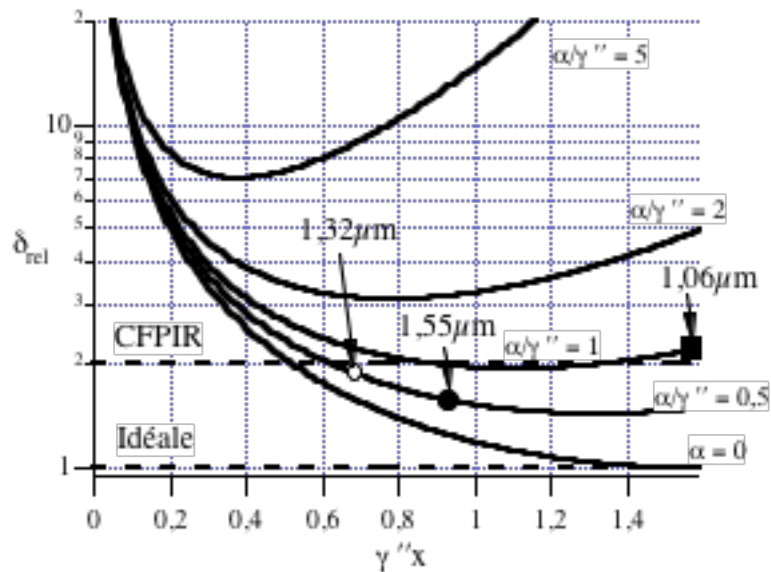
Dans la limite d'une absorption nulle et d'un gain optimum ( $\gamma' d = \pi/2$ ), on obtient une limite de détection relative  $\delta_{\text{rel}}$  de 1, telle qu'attendue d'un système de détection idéal. En pratique, l'écriture de réseaux photoréfractifs nécessite l'absorption de photons afin de créer les porteurs libres qui sont repiégés ailleurs dans le cristal. On peut toutefois s'approcher de la détection idéale en utilisant un cristal ayant une absorption faible et satisfaisant la condition de gain optimum. Il est aussi à noter que le temps d'écriture du réseau est proportionnel à l'absorption du cristal et avec un temps de réponse trop long, le réseau ne peut s'adapter aux vibrations ambiantes. Ainsi la valeur de l'absorption optimum résulte d'un compromis entre la détectivité et le temps de réponse.

Nous avons décrit la configuration la plus simple du capteur d'ultrasons par mélange à deux ondes mais plusieurs autres configurations sont possibles [DEL 97]. Une configuration opérant avec des faisceaux dépolarisés a aussi été proposée [DEL 99].

### 3.3. Performances du capteur

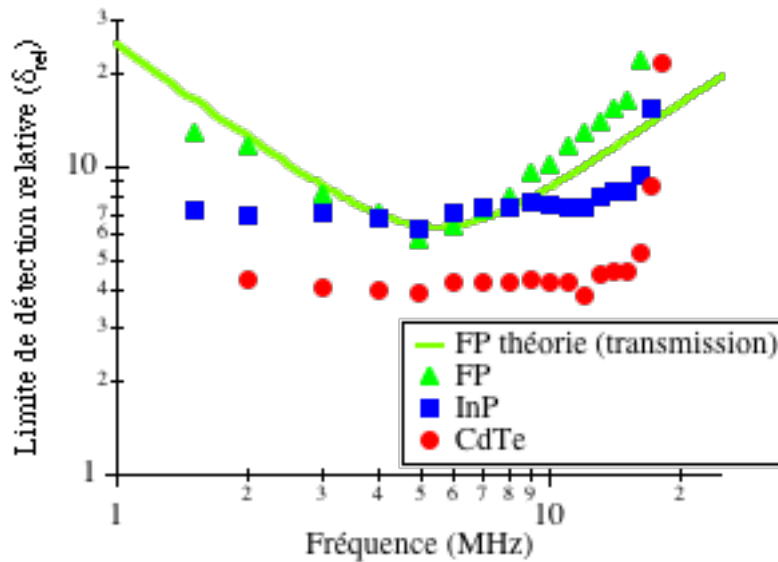
Nous avons effectué des études avec des cristaux semi-conducteurs de GaAs, d'InP:Fe et de CdTe:V à des longueurs d'onde du proche infrarouge de 1 à 1.55  $\mu\text{m}$ . Les meilleurs résultats ont été obtenus avec des cristaux de CdTe:V sous tension [DEM 97]. La figure 3 présente les résultats théoriques et expérimentaux obtenus.

L'étendue du dispositif est déterminée par l'angle entre les faisceaux signal et pompe et par la taille du cristal. Pour les valeurs de cet angle permettant d'optimiser la détectivité du capteur et pour un cristal de quelques millimètres de côtés, l'étendue obtenue est typiquement de l'ordre de  $1 \text{ mm}^2\text{sr}$ . Cela permet d'utiliser une fibre multimode de large coeur et de grande étendue pour amener la lumière collectée de la cible au capteur (Fig. 4).



**Figure 3.** Courbe théorique et points expérimentaux indiquant la détectivité du capteur en fonction du rapport du gain photoréfractif sur l'absorption. La limite de détection idéale ainsi que la limite de détection d'un Fabry-Perot confocal (CFPIR) utilisé en mode réflexion sont indiquées sur la figure.

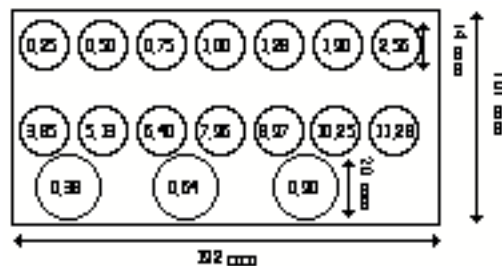
En ce qui a trait au temps de réponse, des temps de réponse de l'ordre de la centaine de  $\mu\text{s}$  sont possibles avec des lasers continus, ce qui est satisfaisant pour certaines applications. En utilisant un laser impulsionnel des temps de réponse de l'ordre de  $1 \mu\text{s}$  avec tension appliquée et  $100 \text{ ns}$  sans tension ont été obtenus, ce qui permet au capteur de s'adapter aux vibrations rencontrées en industrie. Notons qu'un temps de réponse de  $1 \mu\text{s}$  correspond à une fréquence de coupure d'environ  $100 \text{ kHz}$ . Néanmoins, ces temps de réponse ne sont pas suffisants pour s'adapter aux variations d'une cible que se déplace rapidement et limite la vitesse possible de balayage d'une pièce. Le Fabry-Perot confocal est par contre beaucoup plus rapide, le temps d'adaptation du Fabry-Perot étant à peu près égal au produit de la finesse par le temps d'aller-retour dans le Fabry-Perot. Par exemple, pour un Fabry-Perot confocal de  $1 \text{ m}$  ayant une finesse de  $10$  i.e. des miroirs de  $85 \%$  de réflectivité, le temps de réponse est d'environ  $70 \text{ ns}$ .



**Figure 4.** Réponses en fréquence du capteur photoréfractif et du Fabry-Perot obtenus pour des faisceaux tavelés. La limite de détection relative obtenue est proche de celle obtenue avec des ondes planes (Fig. 3).

Les réponses en fréquence du capteur photoréfractif et du Fabry-Perot sont présentées à la figure 4. Cette figure montre que la moins grande rapidité rend le capteur par mélange à deux ondes plus sensible aux basses fréquences ultrasonores. Cette meilleure sensibilité aux basses fréquences est utile pour l'inspection de matériaux qui atténuent fortement les ultrasons. Cette atténuation est habituellement causée par la diffusion des ultrasons par la microstructure et augmente avec la fréquence ultrasonore. Pour démontrer l'avantage d'une meilleure détectivité aux basses fréquences, nous avons balayé une pièce de graphite-epoxy, matériau utilisé dans l'industrie de l'aéronautique pour sa résistance mécanique et sa légèreté. L'épaisseur des pièces utilisées dans l'industrie varie de la fraction de mm à plusieurs cm, d'où pour des pièces épaisses, une sensibilité aux basses fréquences nécessaire pour obtenir un rapport signal-à-bruit supérieur à 1 sans endommager le matériau avec le laser de génération. Nous avons utilisé une plaque de graphite-epoxy de 12.5 mm d'épaisseur, truffée de trous à fond plat de différentes dimensions (Fig. 5). Les ultrasons étaient générés par un laser TEA-CO<sub>2</sub> de 100 ns. Les déplacements ultrasonores étaient détectés à l'aide d'un laser Nd:YAG longue impulsion (50 $\mu$ s) très stable [MON 98]. Les lasers de génération et de détection balayaient simultanément la face plate de la plaque de graphite-epoxy. La lumière du laser de détection collectée de la surface était envoyée au moyen d'une fibre multimode au capteur photoréfractif opéré avec l'InP:Fe sous tension ou à un Fabry-Perot confocal de 1 m avec des miroirs de 85 %. L'onde pompe du dispositif

photoréfractif était ajustée pour obtenir un temps de réponse d'environ 1  $\mu$ s. Les résultats sont présentés à la figure 6. Les B-scans montrent que le nombre d'échos visibles est plus élevé avec le capteur photoréfractif qu'avec le Fabry-Perot. On montre aussi des C-scans centrés sur les deuxièmes et troisièmes échos qui confirment que le rapport signal-à-bruit s'atténue moins rapidement pour le capteur photoréfractif, tel qu'attendu d'un dispositif plus sensible aux basses fréquences ultrasonores.

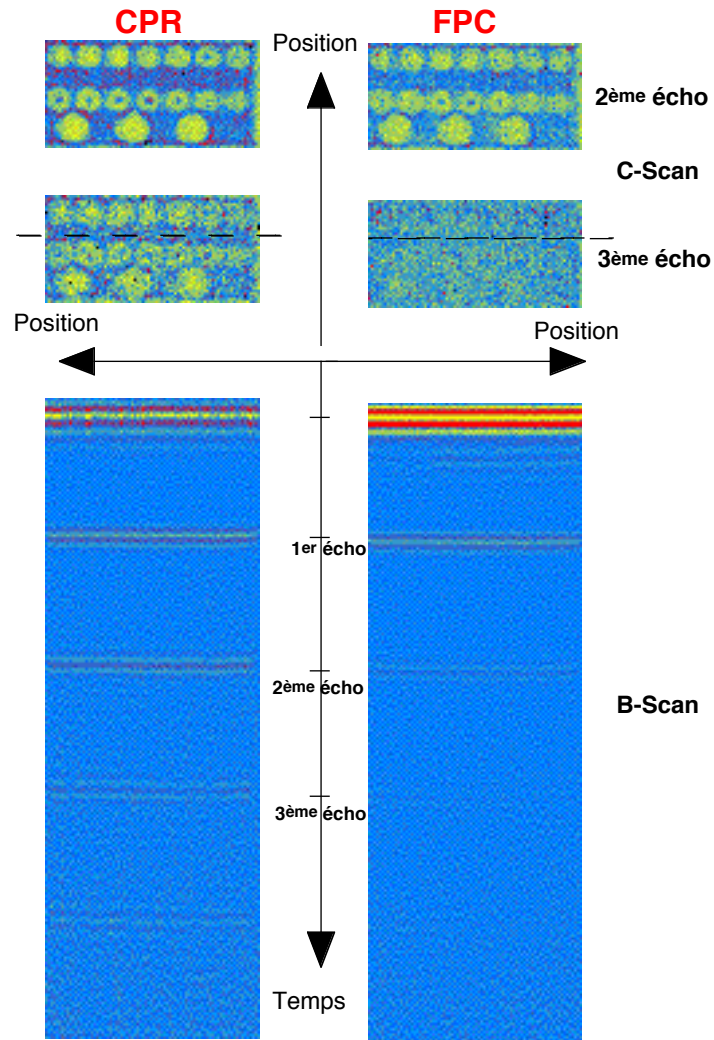


**Figure 5.** Schéma de la pièce de graphite-epoxy. Les nombres indiquent la distance entre la surface plate de la pièce et le fond du trou à fond plat.

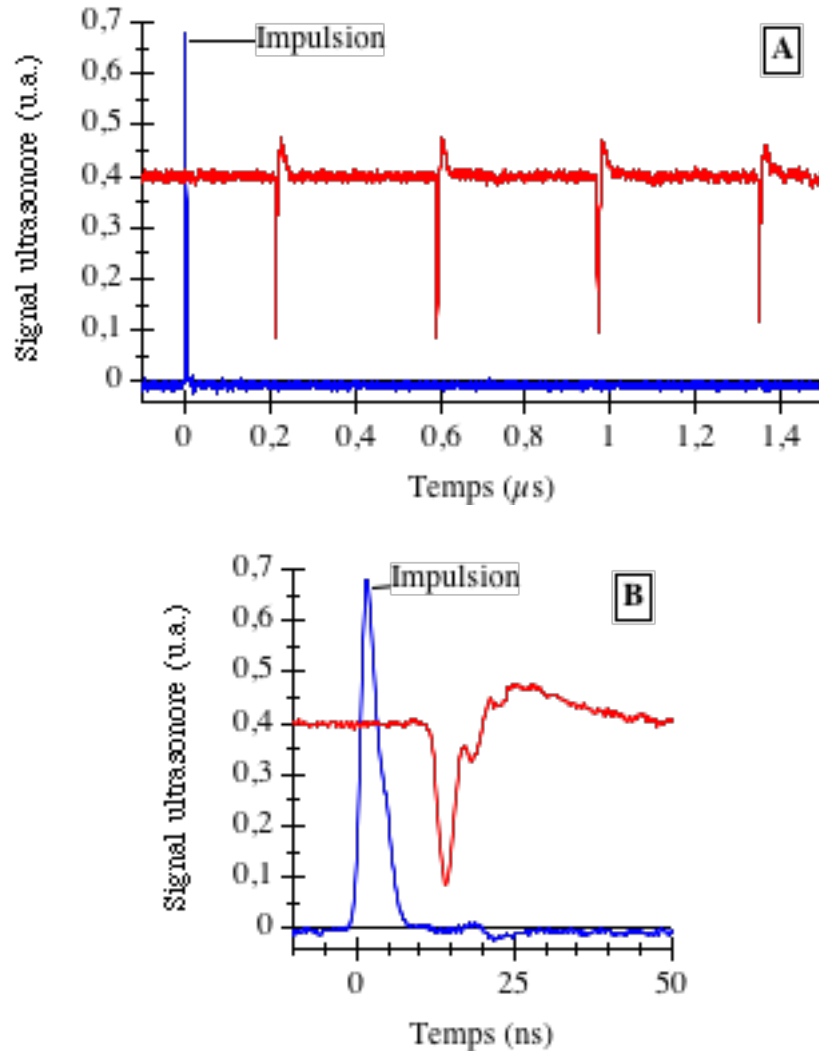
Un autre avantage du capteur photoréfractif d'ultrasons est sa détectivité à hautes fréquences. En effet, la réponse en fréquence du capteur photoréfractif est similaire à celle d'un filtre passe-haut. Sa réponse en fréquence est plate pour des fréquences supérieures à la fréquence de coupure et n'est limitée à hautes fréquences que par la fréquence de coupure du photodétecteur utilisé (par exemple 15MHz pour les mesures de la figure 4).

Le montage est donc capable de mesurer de très hautes fréquences ultrasonores. Par exemple, la figure 7 montre des signaux générés dans une plaque de silice par un laser eximère dont la durée d'impulsion est d'environ 3 ns.

Le photodétecteur utilisé est une photodiode InGaAs PIN ayant une bande passante de 350 MHz. Un filtre analogique passe-haut à 25 MHz était utilisé pour éliminer l'enveloppe du laser de détection et pour accroître le poids du contenu haute fréquence par rapport au contenu basse fréquence généré. En comparaison, le Fabry-Perot confocal utilisé en réflexion n'a pas une réponse plate. Sa réponse en fréquence présente des trous à un intervalle égal à l'intervalle spectral libre et dont la largeur dépend de la finesse.



**Figure 6.** B-scans et C-scans du balayage laser-ultrasons de la plaque de graphite epoxy de la figure 5 obtenus avec un capteur Fabry-Perot confocal de 1 m avec des miroirs de 85 % en mode transmission ainsi qu'avec un capteur photoréfractif basé sur l'InP:Fe sous tension.



**Figure 7.** Signal ultrasonore engendré dans une plaque de silice par un laser eximère. A : forme temporelle du signal, B : zoom de A. où l'on voit l'impulsion optique UV et le premier écho ultrasonore.

#### 4. Conclusion

L'interféromètre adaptatif par mélange à deux ondes dans un cristal photoréfractif décrit dans cet article possède les caractéristiques requises d'un capteur optique d'ultrasons polyvalent. Ce capteur est compact et permet de sonder des surfaces optiquement rugueuses habituellement rencontrées en industrie. Le

capteur opère sur une large bande de fréquence avec une réponse en fréquence plate. Sa fréquence de coupure haute est limitée par les photodétecteurs utilisés et sa fréquence de coupure basse est ajustée par la puissance de la pompe. On peut ainsi obtenir un capteur sensible aux basses fréquences ultrasonores pour l'inspection de matériaux acoustiquement atténuant ou au contraire obtenir un capteur rapide qui s'adapte aux vibrations ambiantes et qui permet des balayages rapides de la surface. Le capteur a une grande détectivité, comparable à celle du Fabry-Pérot en mode transmission lorsqu'opéré avec un cristal d'InP:Fe, et à celle du Fabry-Pérot en mode réflexion avec un cristal de CdTe:V.

### Bibliographie

- [BLO 94] A. Blouin, J.-P. Monchalain, « Detection of ultrasonic motion of a scattering surface by two-wave mixing in a photorefractive GaAs crystal », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, pp.932-934 (1994).
- [BLO 98] A. Blouin, Ph. Delaye, D. Drolet, L.-A. de Montmorillon, J.-C. Launay, G. Roosen, J.-P. Monchalain, « Optical detection of ultrasound using two-wave mixing in semiconductor photorefractive crystals and comparison with the Fabry-Perot », 8<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials, Boulder, Colorado, June 15-20, 1997, edited by R. E. Green Jr. and C.O. Ruud (Plenum Publishing Corporation, 1998), pp. 13-19.
- [BOL 95] E.S Boltz, C. M. Fortunko, M.A. Harmstad, M.C. Renken, « Absolute sensitivity of air, light and direct-coupled wideband acoustic transducers », *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol. 14, pp 967-974, 1995.
- [CAV 81] C.M. Caves, « Quantum mechanical noise in an interferometer », *Phys. Rev. D*, vol. 23, pp 1693, (1981).
- [DEL 95] Ph. Delaye, L.A. de Montmorillon, G. Roosen, « Transmission of time modulated optical signals through an absorbing photorefractive crystal », *Opt. Commun.* vol. 118, pp. 154-164, 1995.
- [DEL 95a] Ph. Delaye, A. Blouin, D. Drolet, J.P. Monchalain, « Heterodyne detection of ultrasound from rough surfaces using a double phase conjugate mirror », *Appl. Phys. Lett.* vol. 67, pp. 3251-3253, 1995.
- [DEL 97] Ph. Delaye, A. Blouin, D. Drolet, L.-A. de Montmorillon, G. Roosen, J.-P. Monchalain, « Detection of Ultrasonic Motion of a Scattering Surface by Photorefractive InP:Fe under an Applied Field », *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 14, pp. 1723-1734, (1997).
- [DEL 99] Ph. Delaye, A. Blouin, D. Drolet, J.-P. Monchalain, L.A. de Montmorillon, G. Roosen. « Polarization independent phase demodulation using photorefractive two-wave mixing », *Appl. Phys. Lett.* vol. 74, pp. 3087-3089, 1999.
- [DEM 97] L.A. de Montmorillon, Ph. Delaye, J.C. Launay, G. Roosen, « Novel theoretical aspects on photorefractive ultrasonic detection and implementation of a sensor with an optimum », *J. Appl. Phys.* vol. 82, pp. 5913-5922, 1997.

- [HUT 88] D. A. Hutchins, « Ultrasonic generation by pulsed lasers », *Physical Acoustics*, vol. XVIII, ed. by W. P. Mason and R. N. Thurston, Academic Press, pp. 21-123, 1988.
- [ING 91] R.K. Ing, J.-P. Monchalin, « Broadband optical detection of ultrasound by two-wave mixing in a photorefractive crystal », *Appl. Phys. Lett.* vol. 59, 3233 (1991).
- [KAM 00] A.A. Kamshilin, K. Päiväsari, M. B. Klein, B. Pouet, « Adaptive interferometer using self-induced electro-optic modulation », *Appl. Phys. Lett.* vol. 77, pp.4098, 2000.
- [MON 86] J.-P. Monchalin, « Optical detection of ultrasound », *IEEE Trans. Sonics, Ultrasonics, Freq. Control*, UFFC-33, pp. 485-499 (1986).
- [MON 86a] J.-P. Monchalin, R. Héon, « Laser ultrasonic generation and optical detection with a confocal Fabry-Perot interferometer », *Materials Evaluation*, vol. 44, pp. 1231-1237 (1986).
- [MON 89] J.-P. Monchalin, R. Héon, P. Bouchard, C. Padioleau, « Broadband optical detection of ultrasound by optical sideband stripping with a confocal Fabry-Perot », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 55, pp. 1612-1614 (1989).
- [MON 98] J.-P. Monchalin, C. Néron, J.F. Bussière, C. Padioleau, R. Héon, M. Choquet, J. D. Aussel, C. Carnois, P. Roy, G. Durou, J. A. Nilson, « Laser-ultrasonics : from the laboratory to the shop floor », *Adv. Perf. Mat.* vol 5, pp. 7-23, 1998.
- [PET 90] M.P. Petrov, I.A. Sokolov, S.I. Stepanov, G.S. Trofimov, « Non-steady-state photo-electromotive-force induced by dynamic gratings in partially compensated photoconductors », *J. Appl. Phys.* vol. 68, pp. 2216-2225, 1990.
- [SCR 90] C.B. Scruby, L.E. Drain, *Laser-Ultrasonics: Techniques and Applications*, Adam Hilger, Bristol, UK, 1990.