

Imagerie en milieu diffusant par réinjection laser

Vincent BOUCHER *
Étienne BELIN

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers

RÉSUMÉ

Une méthode optique pour faire des observations à travers les milieux diffusants est décrite. Dans ces milieux, une partie de la lumière servant à éclairer la scène est rétrodiffusée et empêche la vision par des capteurs classiques comme les caméras ou l'œil. La technique utilisée s'appuie sur la sensibilité de certains lasers au retour de la lumière et permet de sélectionner les photons utiles (balistiques) n'ayant pas été diffusés par le milieu. Son avantage est que le détecteur est constitué par la source laser elle-même, ce qui permet une amplification du signal. Il est montré qu'un moyen simple de simuler correctement les effets du brouillard est d'utiliser une cuve remplie de lait dilué. La réalisation d'un système expérimental d'imagerie à travers du lait dilué est ensuite décrite. Les résultats des essais sont positifs et laissent entrevoir des applications possibles dans le domaine de la vision.

DOMAINE : Environnement et sécurité routière.

ABSTRACT

IMAGING WITHIN A DIFFUSING MEDIUM BY MEANS OF LASER RE-INJECTION

An optical method for conducting observations through diffusing media is described in this article. Within such media, a portion of the light that brightens the scene is backscattered and prevents vision by means of conventional sensors, e.g. cameras or the human eye. The technique employed relies upon the sensitivity of a number of lasers as light is reflected back and enables selecting the useful (or ballistic) photons not diffused by the medium. The advantage of this technique lies in the detector, composed of the laser source itself, which serves to amplify the signal. It will be demonstrated that one simple approach to accurately simulating fog effects includes a tank filled with diluted milk. Development of an experimental imaging system through use of diluted milk will also be described herein. Test results are encouraging and lead to potential applications in the field of vision analyses.

FIELD: Environment and road safety.

INTRODUCTION

Le problème de la vision à travers les milieux troubles est rendu très difficile à cause de la diffusion. À l'heure actuelle, certaines techniques permettent d'observer l'intérieur des milieux diffusants, comme par exemple l'imagerie par résonance magnétique (IRM), les ultrasons et les rayons X [1] mais, depuis le milieu des années 1990, le rayonnement visible ou infrarouge est une alternative très intéressante en ce qui concerne la résolution spatiale. De plus, l'imagerie optique est réalisée sans contact, avec des rayons lumineux de faible puissance totalement non invasifs, c'est-à-dire sans aucun danger pour les tissus vivants. Les techniques d'imagerie en milieu diffusant trouvent aujourd'hui leurs principales applications dans le domaine médical [2]. Dans le domaine optique, de multiples techniques ont été mises au point par les laboratoires de recherche [3]. La technique présentée ici a tout d'abord été développée au Laboratoire de spectrométrie physique de Grenoble [4-6] et est aussi étudiée au Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers [7]. Elle est fondée sur la réinjection laser, phénomène qui permet de détecter de très faibles quantités de lumière.

Après un rappel des principes physiques de cette technique, les essais réalisés avec différentes diodes lasers puis les premières expérimentations d'imagerie menées à travers un brouillard simulé sont présentés.

THÉORIE ET ÉQUATIONS DES LASERS

Afin de mieux comprendre le phénomène de réinjection laser et son intérêt pour des mesures, les équations de base des lasers sont tout d'abord développées en fonctionnement classique puis en régime de réinjection. Dans ce dernier cas, l'intensité laser est modifiée selon des paramètres liés à la réflexion du faisceau sur un objet ainsi qu'à sa distance.

* Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers, 23 avenue de l'Amiral Chauvin, BP 69, 49136 Les Ponts de Cé cedex, e-mail : vincent.boucher@equipement.gouv.fr

Lasers de classe B

Les propriétés d'un laser peuvent être modifiées par une réinjection optique au sein de leur cavité. Parmi tous les lasers, ceux de classe B sont particulièrement sensibles à la réinjection. Ce type de laser est défini par la condition suivante :

$$\gamma_{\perp} \gg \gamma_c > \gamma_1 \quad (1)$$

où γ_{\perp} , γ_c et γ_1 sont respectivement le taux d'amortissement de la polarisation du matériau amplificateur, le taux d'amortissement de la cavité et le taux d'amortissement de l'inversion de population. Les lasers solides et semi-conducteurs entrent dans cette catégorie. Lors du démarrage de ces lasers, il existe un phénomène d'oscillations qui s'établit avant de s'amortir et d'atteindre rapidement un état stationnaire. Cependant, la moindre perturbation interne ou externe va réexciter ces oscillations. On peut ainsi mettre à profit cette caractéristique pour détecter la quantité de lumière qui revient dans la cavité laser après traversée d'un milieu diffusant tel que le brouillard.

Équations de base des lasers

Le fonctionnement temporel d'un laser peut être décrit par deux paramètres : l'inversion de population $N(t)$ et le champ électrique $E(t)$. Le système peut alors être décrit par deux équations dynamiques :

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = \gamma_1(N_0 - N(t)) - BN(t)|E(t)|^2 \\ \frac{dE(t)e^{i\omega t}}{dt} = \left[i\omega_c + \frac{1}{2}(BN(t) - \gamma_c) \right] E(t)e^{i\omega t} \end{cases} \quad (2)$$

où $\gamma_1 N_0$ est le taux de pompage, ω_c la pulsation de résonance de la cavité, ω la pulsation optique du champ et B le coefficient d'Einstein. En décomposant le champ électrique en amplitude et en phase selon :

$$E(t)e^{i\omega t} = E_c(t)e^{i\phi_c(t)}e^{i\omega t} \quad (3)$$

on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = \gamma_1(N_0 - N(t)) - BN(t)|E_c(t)|^2 \\ \frac{dE_c(t)}{dt} = \frac{1}{2}(BN(t) - \gamma_c)E_c(t) \\ \frac{d\phi_c(t)}{dt} = \omega_c - \omega \end{cases} \quad (4)$$

Les solutions stationnaires de l'inversion de population et du champ électrique sont calculées directement. On obtient alors :

$$\begin{cases} N_S = \frac{\gamma_c}{B} \\ E_S^2 = E_{\text{sat}}^2(\eta - 1) \end{cases} \quad \text{où } E_{\text{sat}}^2 = \frac{\gamma_1}{B} \text{ et } \eta = \frac{BN_0}{\gamma_c} \quad (5)$$

Ce système donne donc l'intensité laser émise en fonction des paramètres caractéristiques de la cavité laser.

Influence de la réinjection

En régime de réinjection, il faut tenir compte du temps de vol du champ électrique hors de la cavité ; on a alors le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = \gamma_1(N_0 - N(t)) - BN(t)|E(t)|^2 \\ \frac{dE(t)e^{i\omega t}}{dt} = \left[i\omega_c + \frac{1}{2}(BN(t) - \gamma_c) \right] E(t)e^{i\omega t} + \gamma_{\text{ext}} E(t-\tau)e^{i\omega(t-\tau)} \end{cases} \quad (6)$$

Le terme $\gamma_{\text{ext}} E(t-\tau)e^{i\omega(t-\tau)}$ est l'expression du champ décalé dans le temps, τ correspondant au temps de vol aller-retour entre le laser et la cible. On appelle γ_{ext} le coefficient qui traduit le taux de réinjection dans la cavité. On peut alors déterminer les solutions stationnaires du système d'équations. En fixant les dérivées à zéro et en considérant le cas d'une faible réinjection ($\gamma_{\text{ext}} \ll \gamma_c$), on obtient :

$$\begin{cases} N'_S = \frac{\gamma_c - \gamma_{\text{ext}} \cos(\omega\tau)}{B} \\ E'_S = E_S^2 \left(1 + \frac{2\eta}{\eta-1} \frac{\gamma_{\text{ext}}}{\gamma_c} \cos(\omega\tau) \right) \end{cases} \quad (7)$$

Le champ laser avec réinjection s'exprime en fonction du champ sans réinjection ($\gamma_{\text{ext}} = 0$). Si l'on réinjecte à la même pulsation, cela se traduit par une modification des valeurs stationnaires de l'inversion de population et du champ électrique ainsi que de la fréquence optique du laser. Ces nouvelles valeurs stationnaires dépendent de la nature de la cible par le terme γ_{ext} et de la position de la cible de manière interférométrique par le terme $\cos(\omega\tau)$. L'intensité laser fluctue donc en fonction de la nature de la cible et c'est ce changement de valeur qui sera utilisé par la suite dans les expériences pour réaliser des images à travers un milieu diffusant.

EXPÉRIMENTATIONS

Différents types de diodes laser ont été d'abord testés. Un moyen de simuler du brouillard a été ensuite défini. Enfin, les premières images laser obtenues sont présentées.

Réinjection dans les diodes laser

Afin de déterminer la diode laser la mieux adaptée pour des expériences de réinjection, le critère de sélection choisi a été la sensibilité de chaque diode à la réinjection. La sensibilité de la détection peut être jugée par la dynamique, c'est-à-dire la différence entre l'intensité laser avec et sans réinjection. Afin de relever ces intensités, le faisceau laser est modulé à une certaine fréquence. À partir de la FFT (Fast Fourier Transform : transformée de Fourier rapide) du signal, on peut calculer la puissance spectrale du signal à cette fréquence de modulation (en dBm). Trois types de diodes laser ont été expérimentés : une diode de puissance (jonction PN classique), une diode VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) et une diode DFB (Distributed FeedBack). Le tableau I donne les principales caractéristiques de chaque diode laser.

TABLEAU I
Caractéristiques des diodes lasers

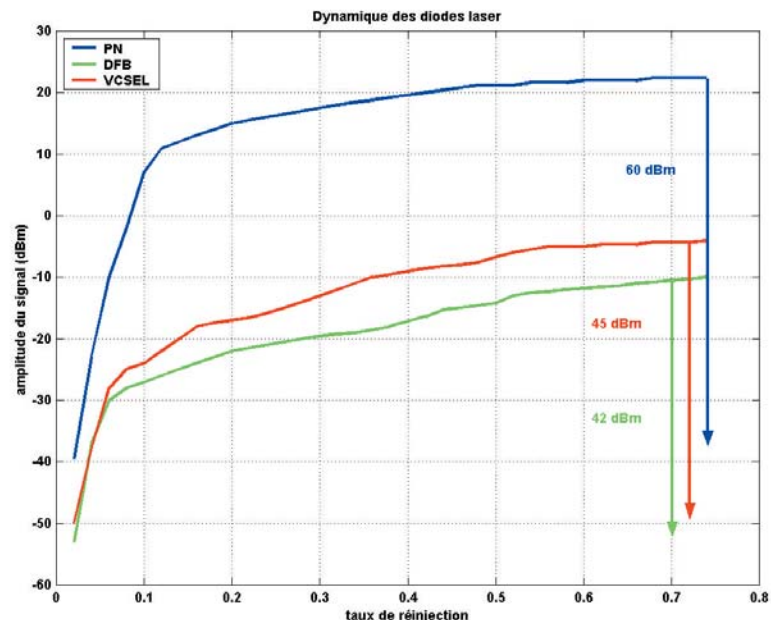
	Jonction PN	VCSEL	DFB
Longueur d'onde (nm)	660	780	1 310
Courant seuil (mA)	140	8	40
Puissance continue (mW)	40	1,6	6

Pour estimer la dynamique d'une diode laser, le protocole expérimental est le suivant : l'intensité du faisceau laser est modulée par un chopper ($f_0 \approx 1$ kHz). Le faisceau est alors réinjecté dans la cavité laser à l'aide d'un miroir ($\gamma_{\text{ext}} = 1$). Le signal de réinjection (intensité du laser modifié) est mesuré à l'aide d'une photodiode. La puissance spectrale du signal à la fréquence f_0 est relevée en fonction du taux de réinjection. Ce taux est fixé par un ensemble de filtres neutres de différentes densités optiques

et peut varier de 0 à 90 %. À l'aide de ces différentes manipulations, on détermine le type de diode laser le plus adapté pour les expériences d'imagerie. La figure 1 présente les résultats des mesures sur les trois types de diodes laser.

Pour la diode VCSEL, la puissance délivrée est très faible. Le courant d'injection ne doit pas dépasser 8 mA. On obtient une dynamique totale de l'ordre de 42 dBm. Pour la diode DFB infrarouge (1 310 nm), la dynamique est de 45 dBm avec l'inconvénient majeur que la longueur d'onde correspond à une bande d'absorption de l'eau et qu'il y aura donc beaucoup d'atténuation lors de la traversée du brouillard. En revanche, on atteint une dynamique de 60 dBm pour la diode de puissance à 660 nm. C'est donc cette dernière qui sera utilisée pour réaliser les premières images laser à travers du brouillard simulé.

□ **Figure 1**
Dynamique des diodes laser en fonction du taux de réinjection.



Brouillard simulé et visibilité

Il n'est pas aisé de manipuler dans des conditions de brouillard naturel en raison du caractère aléatoire de la météo. C'est pourquoi, dans le cadre de ces expériences, un moyen simple et peu onéreux de simuler du brouillard a été d'utiliser une cuve remplie de lait dilué. Pour justifier cette modélisation, la fonction de transfert optique (FTO) a été utilisée. La FTO permet d'analyser l'atténuation des différentes fréquences spatiales par un milieu diffusant. Le principe est de réaliser des images de la même scène dont seul le milieu de propagation de la lumière change. En comparant ensuite les différentes images à une image de référence dans l'espace de Fourier, il est possible d'obtenir l'atténuation du milieu pour chaque fréquence spatiale de l'image. Des détails sur les FTO du brouillard peuvent être trouvés dans la référence [8]. Ces mesures ont permis dans un premier temps de relier l'atténuation globale de la dilution à la concentration en lait. La comparaison de ces FTO avec des données issues de brouillards contrôlés, obtenus dans le tunnel de brouillard du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand, justifie le fait qu'une cuve remplie de lait dilué simule correctement les effets du brouillard. La figure 2 représente les FTO du lait dilué et celles de brouillards mesurées expérimentalement. Les mesures montrent des FTO pratiquement plates de 2 à 30 cycles par degré, donc que les basses et hautes fréquences spatiales sont atténuées de la même manière, ce qui est comparable aux résultats établis sur des brouillards artificiels [8]. En augmentant la concentration en lait, les FTO associées ont des modules de plus en plus faibles traduisant l'atténuation croissante au cours de la propagation.

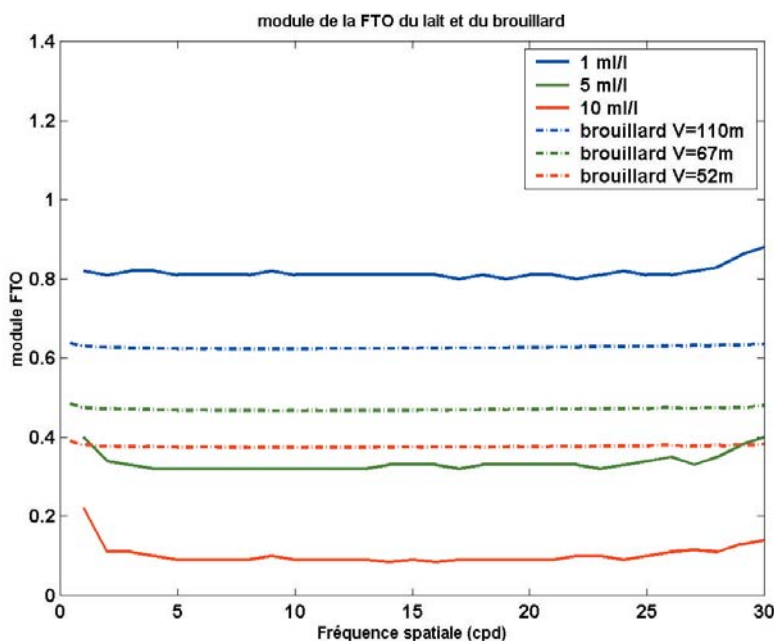


Figure 2
Fonctions de transfert optique
du lait et du brouillard.

Pour obtenir une correspondance entre cette modélisation et un brouillard quelconque, on introduit la notion de densité optique (DO), définie comme le produit du coefficient d'extinction μ par la longueur du milieu traversé L . À partir des intensités mesurées à la sortie de la solution I_S et de l'intensité initiale sans lait I_0 , on peut calculer la densité optique du milieu par la loi de Beer-Lambert :

$$I_S = I_0 \exp(-\mu \cdot L) = I_0 \exp(-DO) \quad (8)$$

soit $\tau = I_S/I_0$ le taux de transmission ; la densité optique est donnée par l'expression suivante :

$$DO = -\ln(\tau) \quad (9)$$

La loi de Beer-Lambert traduit la quantité de photons balistiques ayant traversé le milieu. Pour reproduire à petite échelle la propagation dans un volume de brouillard donné, on agit sur les deux paramètres μ et L de façon à garder fixe la densité optique (c'est-à-dire le taux de photons balistiques). Par exemple, pour une concentration en lait de 5 ml.l^{-1} (soit $\mu = 7,0 \text{ m}^{-1}$) dans une cuve de 16,5 cm, la densité optique est de 1,16. Ainsi, pour un aller-retour, soit une distance de propagation de $2L$, le taux de photons balistiques est égal à 8,9 %. En considérant un brouillard de 16,5 m (ordre de grandeur du tunnel de Clermont-Ferrand), la densité optique reste constante et le coefficient d'atténuation diminue d'un facteur 100, soit $\mu = 0,07 \text{ m}^{-1}$.

Par ailleurs, pour caractériser un brouillard, on peut définir une distance de visibilité météorologique V (en m) comme la longueur d'un trajet dans l'atmosphère au cours duquel le flux lumineux d'un faisceau est réduit de 95 %. À partir du coefficient d'extinction, on peut en déduire une distance de visibilité telle que :

$$V = \frac{3}{\mu} \quad (10)$$

Le tableau II présente la correspondance entre la concentration de lait dans la cuve et la visibilité météorologique calculée pour un brouillard de 16,5 mètres.

TABLEAU II
Équivalence entre la concentration en lait et la visibilité

Concentration lait (ml.l^{-1})	1	3	5	10	15
Visibilité (m)	230	73	43	21	13

Tests d'imagerie

Après avoir choisi la diode laser et caractérisé le milieu diffusant assimilable à du brouillard, l'expérience consiste maintenant à réaliser l'image d'un objet à travers ce milieu. La diode laser constitue à la fois la source et le détecteur puisque son intensité varie selon la quantité de lumière réfléchie. Cependant, le faisceau étant ponctuel, l'information recueillie correspond au point d'impact sur l'objet. Pour réaliser une image à deux dimensions, il faut donc disposer d'un système de balayage du faisceau laser capable de parcourir l'ensemble de l'objet. Ce système a donc été fabriqué à partir de moteurs pas à pas surmontés de miroirs. Les moteurs sont pilotés à partir d'un micro-ordinateur de type PC et, à chaque pas des moteurs, l'intensité laser est enregistrée et gardée en mémoire afin de reconstituer l'image une fois le balayage effectué. Le flux lumineux est modulé à l'aide d'un chopper à une fréquence f_0 . Selon cette fréquence, l'acquisition d'un point nécessite entre 10 et 100 millisecondes. La cible (5 cm × 8 cm) est constituée d'un papier réfléchissant sur lequel est collée une flèche noire. C'est la distance D cible-miroirs qui détermine la résolution des images. Les pas des moteurs étant respectivement de $0,45^\circ$ et $0,9^\circ$ dans les directions horizontales et verticales, la distance D est fixée à une vingtaine de centimètres afin d'avoir une image de la cible de 30×30 points. Dans cette configuration, la distance laser-cible correspond à 1,5 m. La figure 3 présente le schéma du montage

Les résultats des acquisitions pour différentes concentrations en lait sont présentés sur les figures 4, 5 et 6. Juxtaposée à l'image laser, une photo numérique de la cible vue à travers la cuve est présentée. La

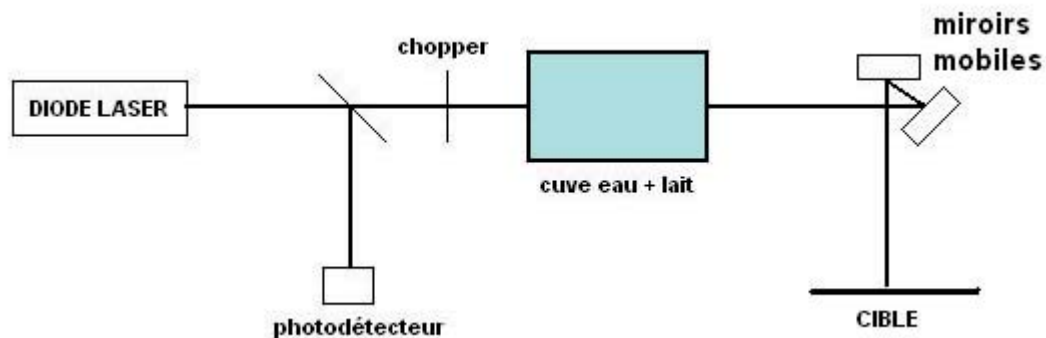


Figure 3

Schéma du montage d'imagerie laser.

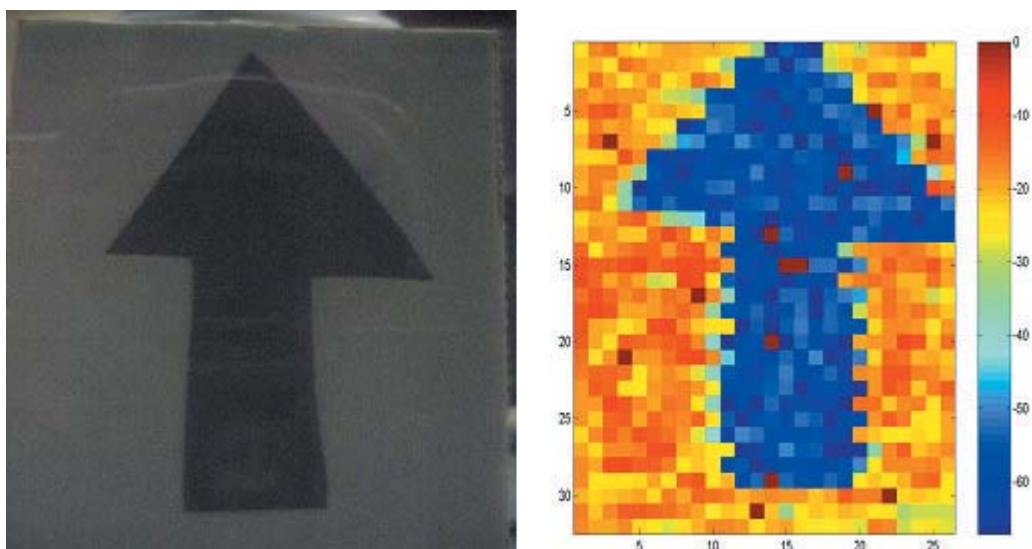
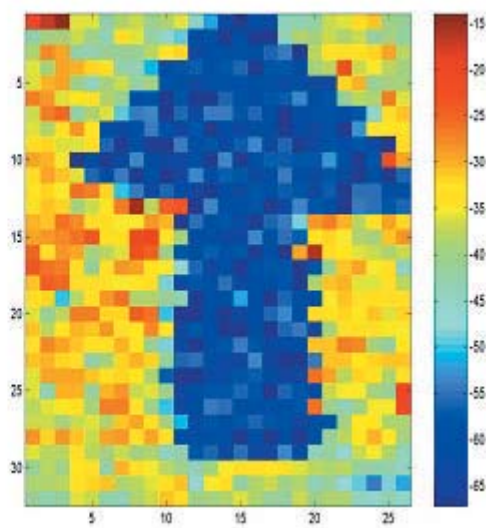


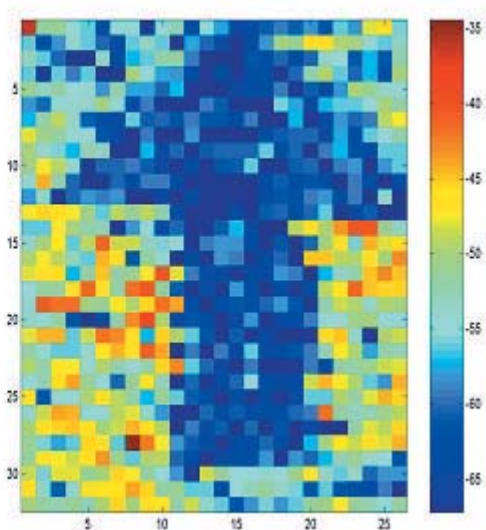
Figure 4

Images à travers la cuve d'eau. Contraste = 0,9. À gauche : photo numérique. À droite : image laser.



□ **Figure 5**

Images avec 5 ml.l^{-1} de lait. Contraste = 0,75. À gauche : photo numérique. À droite : image laser.



□ **Figure 6**

Images avec 10 ml.l^{-1} de lait. Contraste = 0,25. À gauche : photo numérique. À droite : image laser.

figure 4 présente le résultat après traversée de la cuve remplie d'eau. Le contraste de l'image est encore très bon malgré la traversée de la cuve. Le contraste est calculé comme le rapport de la soustraction des valeurs maximale et minimale du signal par leur somme. La figure 5 correspond à une concentration de 5 ml.l^{-1} , soit une visibilité de 43 m. La flèche peut encore être distinguée sur la photo numérique et le contraste n'est plus que de 0,75. Enfin, sur la figure 6 (concentration de 10 ml.l^{-1}), l'objet n'est plus détectable à l'œil alors qu'il l'est encore facilement sur l'image laser. Le contraste est alors de 0,25.

CONCLUSION

L'imagerie par réinjection laser possède un fort potentiel exploitable pour des applications de vision en milieu diffusant. En effet, les différentes expériences réalisées à travers le lait dilué donnent des résultats probants. Même avec une concentration élevée en lait, il est possible de distinguer les contrastes d'une cible réfléchissante. Le principe physique et la faisabilité de l'expérience étant démontrés, on s'attachera à confirmer ces premiers résultats en réalisant un système d'imagerie capable d'opérer en brouillard grandeur nature et sur de grandes distances. Pour élargir au maximum les champs d'application de cette technique, différents milieux diffusants devront être testés (brouillard artificiel et naturel, liquide en mouvement, liquide trouble, fumées).

- [1] DEMEURE R.J., Physique IRM – IRM d’aujourd’hui et de demain, *Louvain Med*, **118**, mai **1999**, pp. 107-113.
- [2] MORDON S., *Imagerie médicale : les techniques photoniques*, école d’été, *La physique pour la santé : du diagnostic à la thérapie*, 26-29 août **2002**, 226 pages.
- [3] MONERON G. *et al*, Tomographie optique, *Photoniques(Orsay)*, **14**, juin **2004**, pp. 33-35.
- [4] DAY R., *Une nouvelle technique d’imagerie laser basée sur la réinjection décalée en fréquence / Laser Optical Feedback Imaging (LOFI)*, thèse de doctorat ès Physique, université Joseph Fourier, Grenoble I, décembre **2000**, 139 pages.
- [5] DAY R., LACOT E., STOECKEL F., BERGE B., Three-dimensional sensing based on a dynamically focused laser optical feedback imaging technique, *Applied Optics*, vol. 40, **12**, avril **2001**, pp. 1921-1924.
- [6] LACOT E., DAY R., STOECKEL F., PINEL J., Laser relaxation oscillation frequency imaging, *Optics Letters*, vol. 26, **19**, octobre **2001**, pp. 1483-1485.
- [7] BOUCHER V., BELIN E., *Réinjection LASER : Application à l’imagerie en milieu diffusant*, LCPC-LRPCA, Études et recherches des LPC, **2004**, Mesure et traitement de l’information, 11A025, 38 pages.
- [8] FOURNELA F., *Mesures de FTO de brouillards artificiels*, LCPC-LRPCA, Études et recherches des LPC, **2001**, Brouillard, 1.6.9.6.1.2.0.0, 60 pages.