

**LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE STIMULÉE,
UNE NOUVELLE TECHNIQUE DE CONTRÔLE
SUR LES LIGNES DE PRODUCTION ?**
*LOCK-IN THERMOGRAPHY,
TOWARDS A NEW ONLINE NDT METHOD?*

MAILLARD S.⁽¹⁾, CADITH J.⁽¹⁾, WALASZEK H.⁽¹⁾, DILLENZ A.⁽²⁾, BODNAR J. L.⁽³⁾

⁽¹⁾CETIM – Pôle Ingénierie Contrôle et Mesures – 52, avenue Félix Louat
60300 SENLIS – France
Tél. : 03 44 67 33 12 – Fax. : 03 44 67 33 52
E-mail : samuel.maillard@cetim.fr

⁽²⁾ e/de/vis GmbH – Nobelstr. 15
D-70569 Stuttgart – Allemagne
Tél. : +49 (0)711 6868 779 0 – Fax. : +49 (0)711 6868 779 6
E-mail : info@edevis.de

⁽³⁾ Laboratoire d'Energétique et d'Optique – UFR Sciences Exactes et Naturelles
BP 1039 – 51687 REIMS Cedex 2 – France
Tél. : 03-26-91-32-52 – Fax. : 03-26-91-32-50
E-mail : jl.bodnar@univ-reims.fr

Résumé

L'augmentation des exigences clients, qui se traduit souvent dans l'industrie par la nécessité du contrôle qualité à 100% des pièces produites, impose aux industriels de mettre en œuvre des stratégies de contrôle non destructif toujours plus évoluées. Dans le but d'aider les industriels à relever à ce défi, le CETIM mène en permanence une veille technologique sur les techniques de contrôle non destructif en cours de développement et contribue au transfert vers les entreprises de la mécanique des plus prometteuses d'entre elles.

Dans le cadre de projets de recherche du CETIM sur la mise en forme des matériaux métalliques (emboutissage, forge, ...), il est apparu intéressant de se pencher sur les évolutions de la thermographie infrarouge, et notamment sur le contrôle actif qui peut être réalisé à l'aide de différents moyens de stimulation thermique (lampes halogènes, lampes flashes, ultrasons, courants de Foucault, ...) de la pièce à contrôler. Pour ce faire, le CETIM s'est alors rapproché du LEO de l'Université de Reims et de la société e/de/vis (Stuttgart) qui contribuent grandement à l'essor de cette technique.

Nous avons ainsi réalisé une étude de faisabilité pour le contrôle en ligne de pièces métalliques de différentes tailles. Celle-ci nous a permis de déterminer les types de défauts observables avec cette technique et de fixer les limites d'une utilisation potentielle sur site.

Abstract

Customers demand increase in the industry often requires a 100% quality control of the production, that leads manufacturers to carry out more and more advanced non destructive testing strategies. In order to help the industrialists to take up this challenge, the CETIM has a permanent technological survey activity in the NDT area and investigate how to transfer the most interesting methods to the French mechanics manufactures.

As part of CETIM research projects about metallic material forming (stamping, forge,...), recent evolutions in the infrared thermographic technology seemed to be of particular interest. We mainly paid attention to the developments into active measurement that could be performed using many stimulation ways such as halogen lamps, flash lamps, ultrasonic waves, Eddy current,... CETIM then got in touch with the LEO (University of Reims) and with the company e/de/vis (Stuttgart) that widely contributes the development of this technique. Feasibility tests for on-line control of metallic parts forming have been performed. According to the samples size, the kind of defects that could be detected has been checked and the limits of an industrial application have been highlighted.

INTRODUCTION - CONTEXTE DE L'ETUDE

Dans la cadre de son activité en Ingénierie de Contrôle et de Mesures, le CETIM est chargé d'évaluer et de promouvoir les différentes méthodes de contrôle non destructif. De part ses contacts privilégiés avec les différents industriels de la mécanique, le CETIM permet également l'émergence de nouvelles techniques répondant notamment à l'augmentation des exigences clients dans la qualité des pièces produites.

Ainsi, le taux de rebut sur le formage de pièces métalliques (emboutissage, assemblage, forge, ...) doit s'approcher de zéro, nécessitant alors un contrôle qualité à 100% des pièces produites.

Parmi les techniques CND existantes, nous nous intéressons tout particulièrement à la thermographie infrarouge qui présente l'intérêt d'être une méthode globale au potentiel d'automatisation très important.

Cette communication présente l'état de l'art du contrôle thermographique infrarouge en mettant l'accent sur les développements les plus récents qui seront illustrés par des premiers résultats expérimentaux sur une pièce métallique présentant une amorce de fissure.

DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE A LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE STIMULEE

La thermographie infrarouge, une méthode de contrôle globale

La thermographie infrarouge permet une mesure globale et sans contact de la température d'objets présents dans la scène thermique analysée [1]. Elle est particulièrement bien adaptée aux cas où les gradients de température sont importants et les coefficients de dissipation thermique des matériaux sont faibles. Pour ces applications en effet, le diagnostic peut directement être réalisé par l'opérateur à partir de l'image thermique obtenue sur la caméra.



Figure 1 : Contrôle de défaut de calorifuge par thermographie sur un équipement sous pression (CETIM)

Ainsi, grâce aux évolutions technologiques du matériel, l'utilisation des caméras thermographiques est devenue beaucoup plus souple. On voit notamment l'essor des dispositifs portables avec une interface assez simple pour des mesures occasionnelles, mais également des systèmes plus sophistiqués mis à demeure dans une usine.

La thermographie s'est ainsi imposée comme la méthode de référence pour le contrôle de nombreuses applications [2] telles que le contrôle d'installations électriques ou le contrôle de l'isolation thermique des bâtiments. Dans ce type d'applications, les éléments des scènes thermiques observées sont naturellement émetteurs de chaleur. C'est par l'observation des variations de flux thermique dans la scène que l'opérateur effectue le diagnostic.

En revanche, dans le cas des applications habituellement rencontrées en contrôle non destructif, les éléments à contrôler (pièces, assemblages ...) ne génèrent pas spontanément de la chaleur. L'idée est alors de soumettre la pièce à une excitation extérieure, mécanique ou thermique par exemple, et d'analyser la propagation de la chaleur dans celle-ci. On parle alors de thermographie infrarouge stimulée. Dans le cas où la pièce observée présente un défaut, la répartition de chaleur dans la pièce est modifiée et une analyse fine du thermogramme permet de le mettre en évidence.

La thermographie infrarouge stimulée, avec une excitation ponctuelle

C'est dans cette démarche que, depuis plus d'une dizaine d'années, le laboratoire d'Energétique et d'Optique de l'université de Reims développe la radiométrie photométrique selon la méthode du « flying spot laser » (cf. *figure 2*) [3].

L'excitation de la pièce se fait par un faisceau laser focalisé soumis à une déflexion (la vitesse d'analyse varie entre 100m/h et 200m/h). Pour la détection, afin d'obtenir des résolutions spatiale et temporelle suffisantes pour une caractérisation dimensionnelle des défauts, on utilise une caméra thermographique infrarouge équipée d'un microscope fonctionnant en mode balayage ligne.

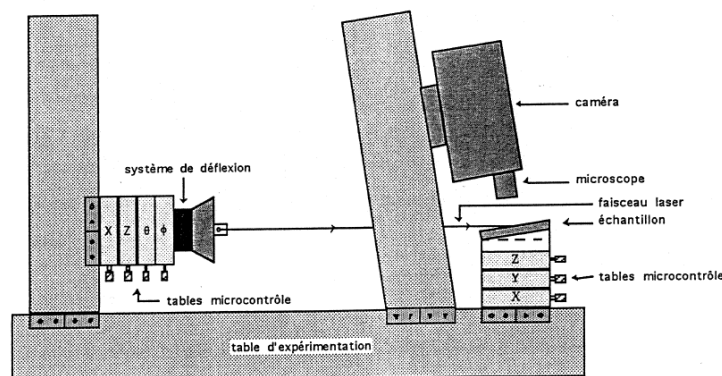


Figure 2 : Dispositif thermographique de détection de fissure par excitation laser [3]

La procédure expérimentale suivie consiste à faire progresser pas-à-pas, d'une distance correspondant au champ élémentaire vu par un pixel (soit $12,5\mu\text{m}$), et de façon synchrone avec le balayage ligne de la caméra, le spot excitateur selon une ligne perpendiculaire à la fissure de l'échantillon, tout en maintenant immobile à la fois l'échantillon et la chaîne de détection optique infrarouge. La durée d'un tel contrôle varie en fonction de la taille de l'échantillon et de la résolution recherchée. Elle est de l'ordre de quelques minutes.

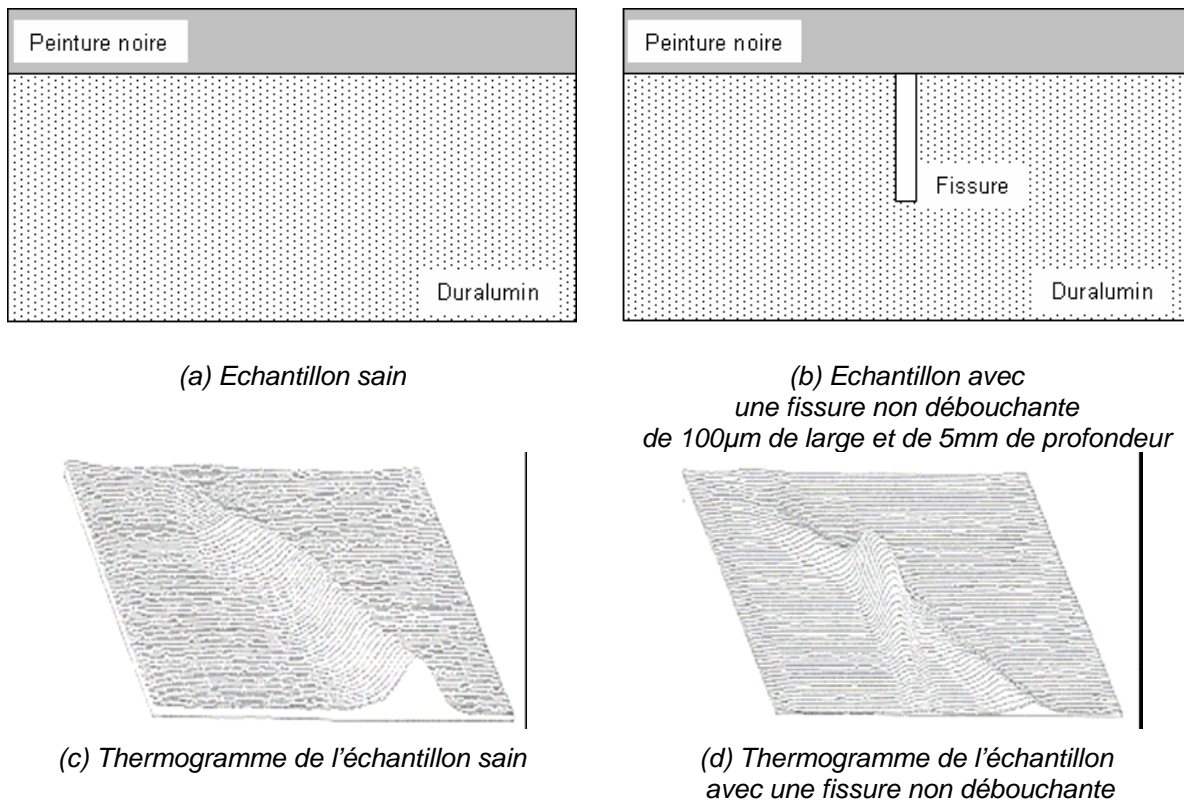


Figure 3 : Détection par thermographie photothermique sous excitation de type « flying spot » d'une fissure non débouchante sur une pièce métallique recouverte de peinture polyuréthane noire [4]

Le thermogramme représenté sur la *figure 3-(c)* est celui d'un échantillon métallique sain recouvert d'une fine couche de peinture noire (*figure 3-(a)*) ce qui permet d'accroître le signal photothermique. Il représente en fait, en 3D, les réponses photothermiques instantanées des éléments de surface successivement excités : le maximum de chacune d'elles décrit une diagonale correspondant au mouvement du spot excitateur et de la tâche de détection [4].

La *figure 3-(d)* représente le thermogramme de l'échantillon métallique décrit sur la *figure 3-(b)* et qui contient une fissure de 100µm de large et de 5mm de profondeur recouverte d'une fine couche de peinture (~20µm d'épaisseur). A la différence du thermogramme de l'échantillon sain, la *figure 3-(d)* laisse apparaître une seconde bande de thermosignal dont les valeurs sont plus élevées. Celle-ci est en fait caractéristique de la présence d'une fissure dans l'échantillon contrôlé : la fissure présente sous le revêtement tend ainsi à retarder le flux de chaleur provenant de l'excitation, ne le rendant visible que sur le signal de la ligne d'excitation voisine. Un tel défaut, qui fait intervenir des phénomènes thermiques complexes, fait partie des éléments les plus difficiles à contrôler.

La confrontation des résultats obtenus par cette méthode avec ceux issus de la modélisation est très probante. Une telle étude démontre alors que l'analyse de la propagation de la chaleur dans une pièce métallique est un moyen fiable et robuste pour la détection de fissure, débouchante ou non de quelques dizaines de micromètres de large et de quelques centaines de micromètres de profondeur.

La thermographie infrarouge stimulée, avec une excitation globale

Une méthode telle que celle du « flying spot » peut s'appliquer pour des petits échantillons analysables en laboratoire mais elle manque de souplesse et la durée du contrôle est encore assez longue. Toutefois, ces dernières années, de nouveaux moyens d'excitation des échantillons sont apparus. Ils permettent une excitation globale de la pièce qui, associée à

l'utilisation d'une caméra thermographique matricielle, réduit de manière importante le temps de contrôle, et le rend envisageable en ligne. De plus, à la vue des avancées en traitement d'image et du signal, une automatisation du diagnostic des thermogrammes est possible pour un grand nombre d'applications.

Pour chacune de ces nouvelles méthodes d'excitation, le flux thermique est émis sur l'ensemble de la pièce : soit il est envoyé par impulsion, soit il est modulé en amplitude et/ou fréquence [5]. C'est en réalisant la détection du flux renvoyé par la pièce de manière synchrone avec l'excitation que la sensibilité de la mesure de la scène thermique est grandement améliorée, permettant alors de s'affranchir en partie des états de surfaces des pièces contrôlées. Les moyens d'excitation qui sont actuellement développés sont présentés sur la figure 4.

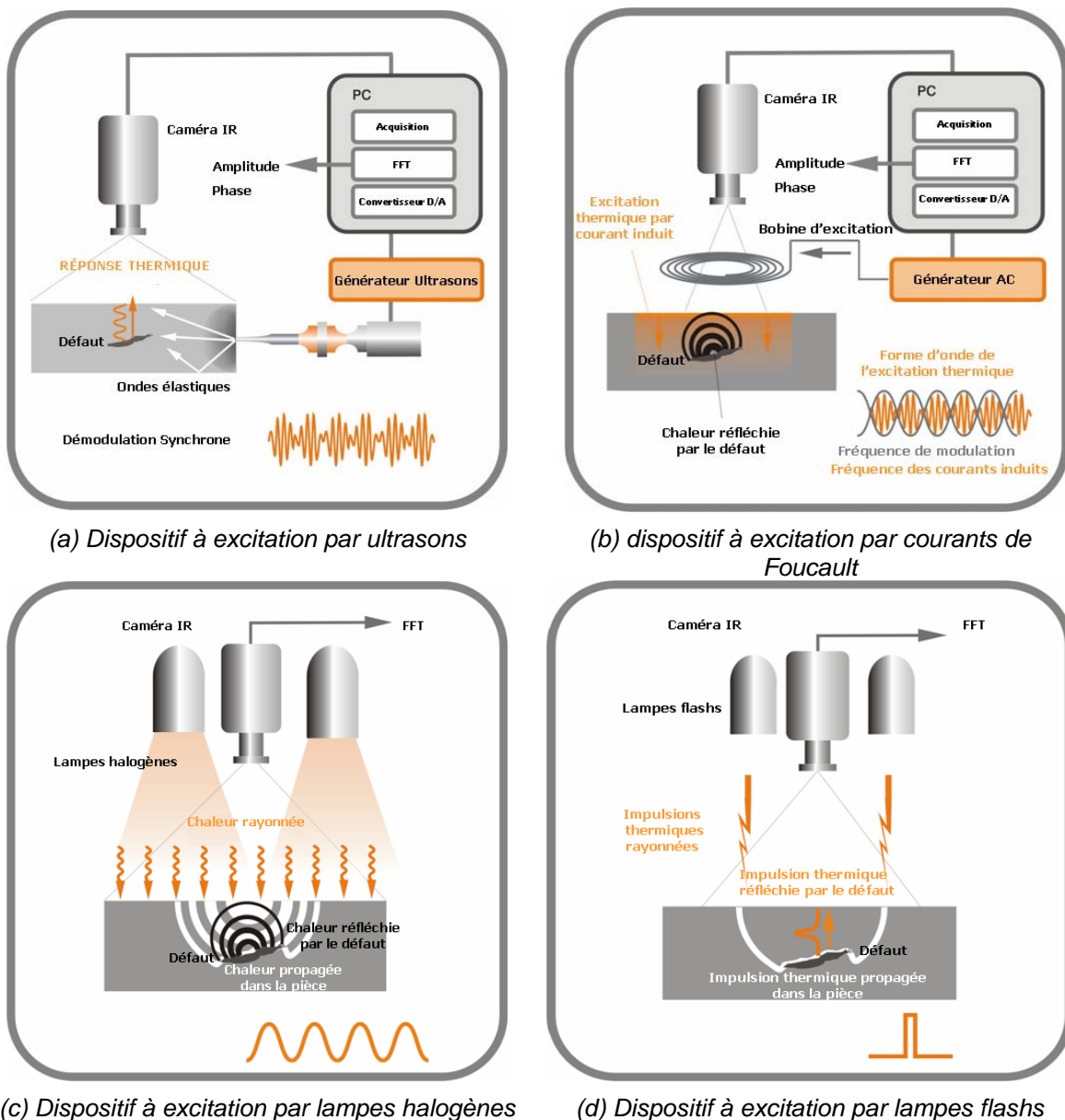
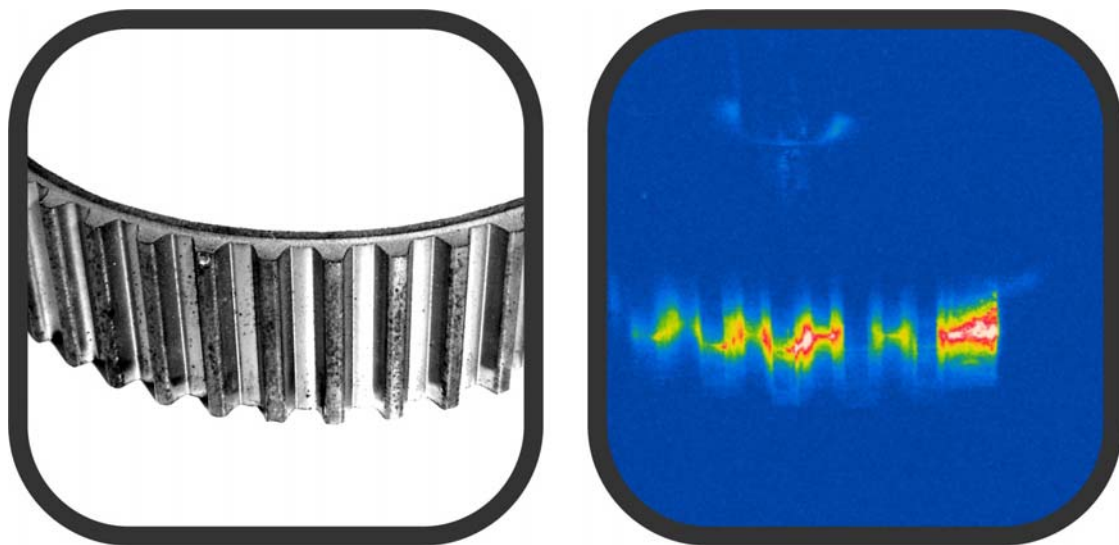


Figure 4 : Les différentes sources d'excitation en thermographie infrarouge stimulée à démodulation synchrone (e/de/vis)

Ainsi, le choix de la source d'excitation et de ses paramètres (durée, amplitude, fréquence,...) joue un rôle important en fonction du matériau, de la taille, de la profondeur et de la nature du défaut à détecter [6].

Il est par exemple préconisé d'utiliser une source d'excitation lumineuse de type halogène modulée en fréquence pour mettre en évidence des délaminages dans les matériaux composites. En revanche, l'estimation d'épaisseurs de revêtements sera plutôt réalisée à l'aide de lampes flashes dont l'énergie est supérieure à 10kJ sur une durée d'environ 1ms.

Dans le cas de détection de défauts type fissures dans les matériaux métalliques, une excitation ultrasonore ou inductive (courants de Foucault) peut être choisie. Un exemple de détection de défauts sur des dents d'engrenage à l'aide d'une excitation ultrasonore est présenté *figure 5*.



(a) Photographie de l'engrenage dans le visible

(b) Thermogramme – Diagramme de phase

Figure 5 : Détection de défauts sur des dents d'engrenages (e/de/vis)

APPLICATION AU CONTROLE EN LIGNE SUR PIÈCES MÉTALLIQUES

Contexte de l'étude

Dans le domaine de l'emboutissage, les industriels doivent sans cesse trouver un compromis entre l'augmentation des cadences de production et le travail de la matière dans ses limites de formabilité. Une légère augmentation de cadence ou le moindre écart sur la qualité de la matière engendre bien souvent l'apparition d'un défaut sur la pièce (effet peau d'orange, crique, amorce de crique,...).

Or, pour des telles pièces, un retour client a généralement un coût exorbitant au regard du prix initial de la pièce concernée. Ainsi, pour une amorce de crique non détectée, il peut coûter à l'emboutisseur jusqu'au prix du produit fini.

Après avoir défini le cahier des charges du contrôle à effectuer pour minimiser le taux de rebut (cadences élevées, forme des pièces complexes et surface importante des zones à contrôler), le CETIM s'est penché sur l'utilisation de la thermographie stimulée à détection synchrone. Nous avons ainsi choisi un panel de pièces (en acier ou en aluminium) représentatif des défauts rencontrés sur les lignes de production et avons évalué l'aptitude de la thermographie infrarouge stimulée pour effectuer du contrôle en ligne. Nous présenterons ici les résultats obtenus sur un carter de boîte de vitesse en acier XES revêtu d'épaisseur 1,30mm.

Dispositif expérimental et traitement des données

Comme le montre la *figure 6*, la pièce est placée sur un banc dédié au contrôle par thermographie infrarouge dans les locaux de la société e/de/vis (Stuttgart). La mesure thermographique a été réalisée à l'aide d'une caméra CEDIP de la gamme Silver. L'excitation thermique des pièces, l'acquisition des images ainsi que la visualisation des résultats ont été gérés par le logiciel DisplayIMG, développé par e/de/vis.

Le principal objectif de ces essais était donc de repérer par thermographie stimulée des défauts de type « crique » ou « amorce de crique » sur des pièces embouties.

Contrairement aux composites, les matériaux métalliques absorbent peu de chaleur et l'excitation par rayonnement infrarouge (lampes halogènes, lampes flashes) n'est donc pas préconisée.

Notre choix s'est alors orienté vers des moyens d'excitation par ultrasons ou par courants de Foucault. Dans ce cas précis, nous avons utilisé le système d'excitation ultrasonore. Une sonotrode est mise en contact avec la pièce et émet des ondes acoustiques de fréquence comprises entre 15 et 50kHz qui se propagent dans la pièce. L'énergie correspondante peut atteindre jusqu'à 4kW pour une fréquence de 20kHz.

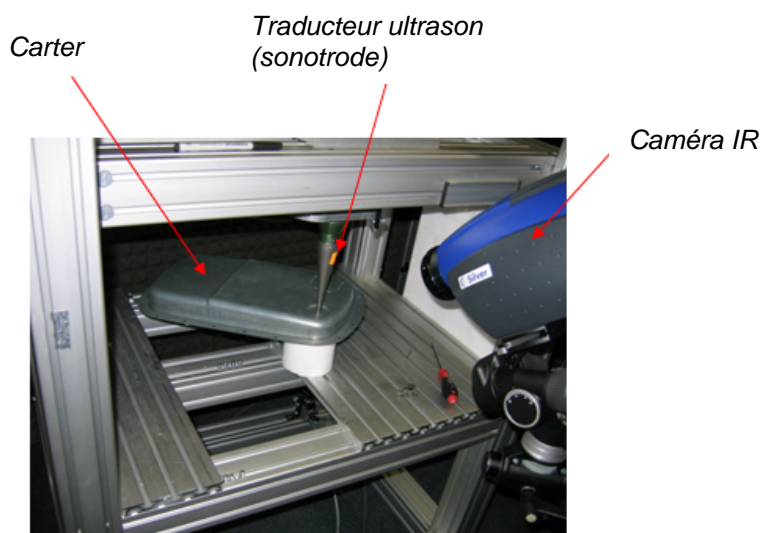
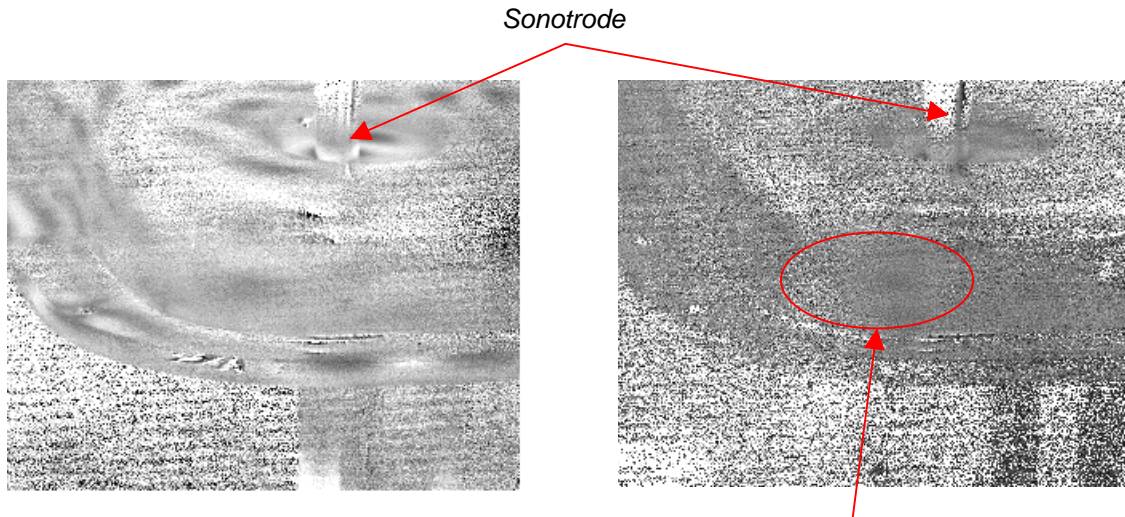


Figure 6 : Dispositif expérimental

Ces ondes excitent alors thermiquement la globalité de la pièce. Lorsqu'elles rencontrent un défaut (fissure ou amorce de fissure), ces ondes induisent des mouvements microscopiques dans la matière, qui produisent un échauffement local, que l'on peut enregistrer au moyen du dispositif thermographique. Par traitement d'images en démodulation synchrone par rapport à la source d'excitation, nous analysons les thermogrammes d'amplitude et de phase, c'est-à-dire l'évolution du gradient de la propagation de la chaleur durant l'excitation de la pièce, qui permettent de faire ressortir les zones où la propagation de la chaleur n'est pas homogène par rapport au reste de la pièce.

Principaux résultats

La *figure 7* représente les thermogrammes de phase obtenus pour des essais sur une pièce présentant un défaut et réalisés à deux fréquences d'excitation différentes.



(a) Thermogramme à la fréquence f_1
proche de la fréquence de
résonance de la pièce

(b) Thermogramme à la fréquence f_2
 $f_2 > f_1$

Légère information pouvant
correspondre au défaut recherché

*Figure 7 : Thermogrammes expérimentaux obtenus sous excitation ultrasonore
à deux fréquences différentes*

Sur la *figure 7-(a)*, l'essai a été réalisé à une fréquence proche de la fréquence de résonance de la pièce. A cette fréquence, les déplacements ont un rôle néfaste pour la visualisation des informations thermiques qui correspondent à un défaut et sa détection est alors peu évidente.

La *figure 7-(b)* correspond quant à elle à un essai réalisé à une fréquence d'excitation supérieure à la fréquence de résonance. Pour celle-ci, les déplacements de la pièce dus aux vibrations sont moindres. On y distingue alors une légère information (zone de l'image moins bruitée) qui correspond au défaut recherché.

Afin d'améliorer le rapport signal-bruit, nous avons modifié le protocole expérimental en approchant le comportement de notre échantillon de celui d'un corps noir (augmentation de son émissivité, réduction des réflexions parasites dans le domaine des infrarouges). Pour cela, nous avons peint les pièces en noir et comparé les thermogrammes obtenus pour des échantillons avec et sans défaut (cf. *figure 8*).

L'information thermique correspondant au défaut recherché apparaît assez nettement sur le thermogramme de la *figure 8-(b)* en comparaison de la *figure 8-(a)*.

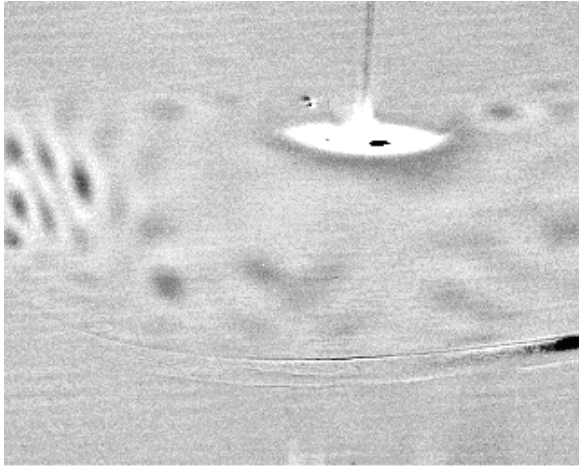
Pour améliorer la visualisation du défaut, nous avons ensuite réalisé des opérations de traitement d'images bas niveau (filtrage, seuillage, ajustement du contraste, codage de l'image en fausse couleurs). Les résultats sont présentés sur les *figures 8-(c)* et *8-(d)*. Le coin présentant un défaut correspondant à une légère amorce de crique apparaît alors très nettement.

Malgré quelques difficultés expérimentales, ces premiers résultats sont encourageants pour la suite de notre étude, notamment si l'on s'intéresse à la qualité des résultats au regard du temps de contrôle des pièces (de l'ordre de quelques secondes).

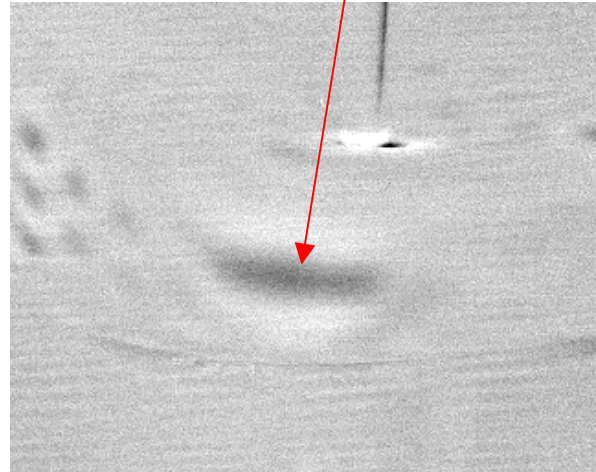
Pièce sans défaut

Pièce avec défaut

Information correspondant à
l'amorce de crrique

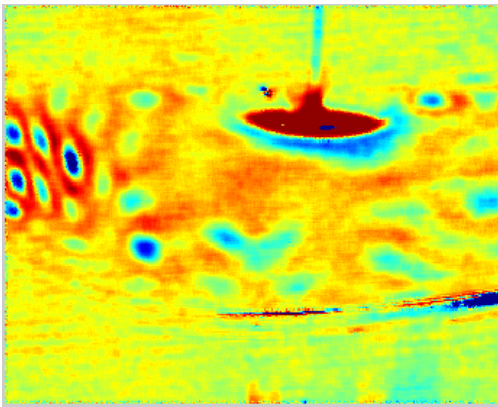


(a)

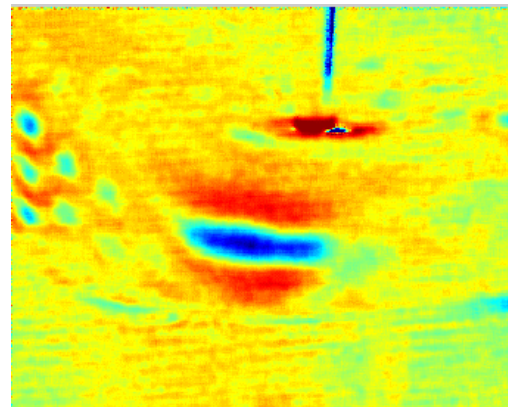


(b)

Sans traitement d'image



(c)



(d)

Après traitement d'image

Figure 8 : Thermogrammes expérimentaux obtenus sous excitation ultrasonore à la fréquence f_2 pour une pièce peinte en noire avec et sans défaut

CONCLUSIONS

Les évolutions récentes de la thermographie infrarouge, des méthodes d'excitation thermique des pièces et de traitement d'images laissent entrevoir de nouveaux horizons pour cette méthode CND. Les résultats présentés ici tendent à montrer qu'en plus des secteurs où la thermographie infrarouge est déjà bien implantée (surveillance d'armoires électriques, diagnostics de bâtiment, contrôle de défauts sur les matériaux composites, ...), elle pourrait se généraliser dans les secteurs recherchant à mettre en évidence des défauts dans les matériaux métalliques.

Néanmoins, bien que la démodulation synchrone de la séquence d'image atténue l'influence des rayonnements infrarouges parasites, nous avons tout de même dû peindre la pièce en noir pour faire ressortir plus nettement les informations thermiques liées au défaut. Même si cette solution n'est pas ou peu envisageable dans un cadre industriel, ces premiers résultats restent encourageants et ont permis d'identifier les freins à l'implantation de cette solution

pour un contrôle en ligne. Il semble notamment intéressant de travailler sur l'amélioration de l'environnement de mesure (vibrations, émissivité des matériaux, ...), l'optimisation des conditions d'excitation (nature de la source, amplitude, fréquence, ...) et du traitement d'images en démodulation synchrone.

En parallèle des travaux sur les méthodes telles que le « flying spot », il paraît aujourd'hui important de s'intéresser à ces méthodes plus globales et plus rapides qui permettront de rendre l'utilisation de cette technique compatible avec des conditions de production, notamment du point de vue des temps de contrôle. De plus, la diversité des sources d'excitation disponibles permet la détection d'un large éventail de défauts dans des matériaux de natures très différentes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Pajani D., Mesure par thermographie infrarouge, Chap. 1 – Introduction, p. 11, ISBN 2-9504171-0-8, 1989
- [2] Pajani D., Mesure par thermographie infrarouge, Chap. 8 – Les applications de la thermographie, p. 331, ISBN 2-9504171-0-8, 1989
- [3] Bodnar J.L., Edée M., Wear characterization by photothermal radiometry, Wear, Vol. 196, 54-59, 1996
- [4] Bodnar J.L., Edée M., Menu C., Besnard R., Le Blanc A., Pigeon M., Sellier J.Y., Cracks detection by a moving photothermal probe, Journal de Physique IV, C7-592, 1994
- [5] Zweschper Th., Dillenz A., Riegert G., Scherling D., Busse G., Ultrasound excited thermography using frequency modulated elastic waves, Insight, Vol. 45, No 3, 2003
- [6] Maldague X., Introduction to NDT by active infrared thermography, Materials Evaluation, Vol. 6, No 9, pp. 1060 -1073, 2002