

# Modélisation et optimisation de la détection de défauts débouchants par thermographie active

Abdoulahad THIAM<sup>1\*</sup>, Jean Christophe KNEIP<sup>1</sup>, Simone MATTEI<sup>1</sup>, Eugen CICALA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Equipe LTm, axe Procédés Métallurgiques Durabilité-Matériaux Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 6303 CNRS - Université de Bourgogne Franche-Comté, 1 Allée des Granges Forestier, 71100 Chalon/Saône, France

\*(Auteur correspondant) : [abdoulahad.thiam@u-bourgogne.fr](mailto:abdoulahad.thiam@u-bourgogne.fr)

**Résumé.** Dans ce travail, nous nous intéressons à l'interaction laser-matière couplée à de la thermographie infrarouge, pour la détection de défauts débouchants dans des matériaux métalliques. A terme, ce procédé de thermographie se veut être une alternative possible à la magnétoscopie et au ressuage dans le domaine des contrôles non destructifs. Dans ce but, un modèle de simulation numérique a d'abord été mis en place sur Comsol Multiphysic® en parallèle avec une observation par une caméra virtuelle, sur lequel nous nous sommes ensuite appuyés, pour nous permettre de rechercher les paramètres optimaux de ce procédé, par la méthode des plans d'expériences numériques.

## Nomenclature

$P$	Puissance du laser, $W$	$k$	Conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$v$	Vitesse de déplacement du laser, $m \cdot s^{-1}$	$C_p$	La capacité thermique massique, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$x_0$	Position initiale du laser sur $x$ , $m$	$Ef$	Efficacité du process
$y_0$	Position initiale du laser sur $y$ , $m$	$A$	Facteur d'absorption
$O^*$	Ouverture réduite	<i>Symboles grecs</i>	
$v^*$	Vitesse réduite	$\varepsilon_p$	Emissivité du matériau avec peinture
$a$	Diffusivité thermique du matériau, $m^2/s$	$\varepsilon_m$	Emissivité du matériau
$t$	Temps de chauffage, $s$	$\sigma_x$	Rayon du faisceau laser à 1/e sur $x$ , $m$
$T$	Température du matériau, $K$	$\sigma_y$	Rayon du faisceau laser à 1/e sur $y$ , $m$
$h$	Coefficient d'échange global, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	$\varphi$	Densité de puissance absorbée par le matériau, $W \cdot m^{-2}$
$An$	Amplitude normalisée	$\rho$	Masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$

## 1. Introduction

Aujourd'hui, les contrôles non destructifs sont devenus incontournables dans le milieu industriel, aussi bien au moment de la fabrication de matériaux ou de structures, que sur des installations en service pour juger de leur état de santé. Parmi toutes les techniques disponibles, le ressuage [1] et la magnétoscopie [2] sont massivement utilisés pour la détection d'anomalies surfaciques. Sur site, les inspections sont réalisées manuellement, sur des zones de dimensions limitées, et nécessitent l'utilisation de produits révélateurs. La détection des anomalies est alors fortement liée à la dextérité de l'opérateur. Depuis plusieurs années, sur des applications spécifiques, l'industrie est à la recherche de méthodes alternatives. Parmi les techniques possibles, la thermographie active [3] apparaît comme une possibilité intéressante.

Généralement, la méthode utilisée sur les matériaux métalliques est basée sur le « flying spot ». Les premiers développements remontent aux années 1960 [4]. Depuis lors, différentes variantes ont vu le jour ainsi que des améliorations [5], [6], [7], [8] [9] [10], concernant essentiellement la manière de faire le balayage ou la détection. Les travaux expérimentaux ont été accompagnés de développements analytiques pour connaître la forme du signal généré par la présence d'un défaut et de pouvoir ainsi le caractériser. Cette technique de CND par

thermographie infrarouge pour la détection de fissures dans des matériaux métalliques est différente de celle classiquement utilisée pour les matériaux composites, dans laquelle des lampes flash sont généralement utilisées comme source d'excitation. Malgré cela, quelle que soit la méthode utilisée, c'est la résistance thermique induite par le défaut qui permet de le localiser, et éventuellement de le caractériser.

Par ailleurs, lors d'inspections, les pièces peuvent présenter des aspérités de surfaces qui peuvent induire localement des changements d'absorptivité et/ou d'émissivité. De plus, le défaut, dans le cas d'une fissure débouchante, peut également se comporter comme un micro-corps noir localisé. Il arrive alors que le signal « optique » du défaut masque l'effet de la résistance thermique. Dans ce cas, cela rend les défauts indiscernables par rapport à de simples rayures, par exemple. Pour pallier à ce problème, une méthode originale a été développée [8], consistant à faire un aller-retour de la source laser. Ce procédé permet alors d'éliminer les effets optiques et d'amplifier la signature thermique du défaut. C'est cette méthode, basée sur l'utilisation d'un laser ligne, pour la détection de défauts débouchants sur des matériaux métalliques, qui a été adoptée dans nos travaux. La première étape consiste à alimenter le modèle numérique par une série de caractérisations expérimentales des matériaux, des lasers et des caméras, pouvant être utilisés au cours des différents essais. Ensuite, un modèle développé sur COMSOL, couplé avec une caméra simulée numériquement, nous permet de générer des images synthétiques d'une scène thermique, telles qu'une caméra réelle la verrait. Le modèle sert ensuite de base pour la réalisation d'une étude d'optimisation de l'installation réelle, via la méthode des plans d'expériences numériques.

## 2. Principes des mesures et caractérisations expérimentales

### 2.1 Principes des mesures

Expérimentalement et numériquement, les deux configurations de mesure se veulent être identiques, et se présentent comme illustrées sur la Figure 1. La Figure 1a montre le faisceau laser se déplaçant avec une vitesse  $v$  suivant la direction  $x$ . La température est mesurée, sur la surface de l'échantillon irradiée par le laser, à l'endroit où se situe le faisceau laser ligne grâce à une barrette de détecteurs thermographiques (dans la direction  $y$ ). Sur la Figure 1b, le faisceau laser ligne se déplace en même temps qu'un point de mesure qui joue le rôle du détecteur dans la simulation sur Comsol Multiphysics. La température est enregistrée sur chaque pas de temps de calcul. Une interpolation est également envisageable pour l'adapter à la fréquence de la caméra choisie.

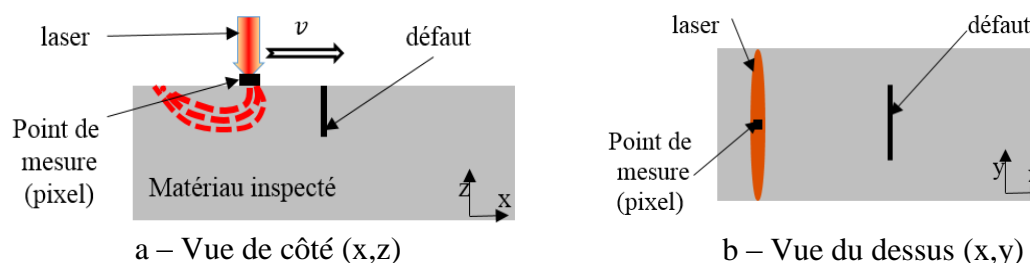


Figure 1 : Principe de la méthode

### 2.2 Caractérisations expérimentales

Pour les besoins de la simulation numérique, de la validation des champs de températures et du code liée à la caméra simulée, des mesures expérimentales sont évidemment nécessaires.

La première difficulté réside pour l'essentiel dans le fait que la thermographie est utilisée pour la détection d'anomalies, sur des matériaux peu émissifs, fortement diffusants thermiquement, faiblement absorbants au rayonnement laser, et dans un environnement thermiquement perturbé, tout cela pour de faibles variations de températures par rapport à la température ambiante. La « température de luminance environnementale » constitue un paramètre clé dans ces conditions, car il influe fortement sur la température finale calculée. Dans les cas étudiés, elle a été évaluée grâce à la préconisation de la norme ASTM E1862-97. L'émissivité, quant à elle, a été obtenue en utilisant une méthode classique de comparaison, grâce à une peinture noire mate d'émissivité connue, proche de 1, appliquée sur une zone saine de l'échantillon. Les dimensions de la source laser ont été déterminées en utilisant une plaque faite d'un revêtement fortement absorbant au rayonnement laser et fortement émissif, de manière à obtenir le signal le plus contrasté possible. L'observation par thermographie, quelques millisecondes après les premiers instants d'irradiation laser, nous permet, par ce procédé, de retrouver la largeur à mi-hauteur du faisceau laser. Grâce à cette valeur nous pourrions accéder à  $\sigma$  par la formule (1) [11]. Dans les cas étudiés, il s'avère que les faisceaux lasers lignes utilisés possèdent des profils gaussiens. La Figure 2 donne le profil du laser obtenu reconstitué sur Comsol. La puissance a également été évaluée grâce à un puissance-mètre pour être certain de la densité de puissance réellement appliquée sur le matériau.

$$\text{largeur à mi hauteur} = 2,355 * \sigma \quad (1)$$

La protection de la caméra par rapport aux rayonnements a nécessité l'usage d'un filtre qui a été étalonné au préalable. Sa transmission est prise en compte pendant les mesures. Le coefficient d'absorption du matériau est estimé à 0,32 [12]

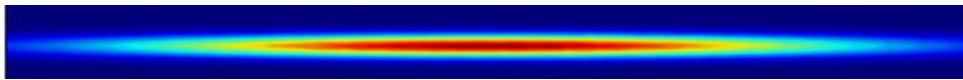


Figure 2 : Profil du faisceau laser gaussien reconstitué avec Comsol après caractérisation

### 3. Modélisation numérique

#### 3.1 Description des modèles numériques utilisés

Au niveau de la modélisation de la détection du défaut, différentes approches ont également vu le jour. On peut citer les approches purement analytiques [13] [8] [14]. D'autres approches ont été développées pour essayer de prendre en compte l'aspect « optique » du défaut [15] [16]. De nos jours l'usage des éléments finis est très répandu avec des approches diverses et variées qui concernent essentiellement des lasers ponctuels [17], [18], [19].

Dans notre étude, différentes approches ont été explorées :

1. Le défaut est rempli d'air et nous lui attribuons une absorptivité différente de celle du métal de base. Cette absorptivité est calculée grâce à la formule de Casselton [6].
2. Le défaut est rempli d'air et nous appliquons une absorptivité nulle à sa surface.
3. Nous considérons le défaut comme étant une couche mince résistive. La résistance thermique imposée est calculée en fonction de l'ouverture du défaut étudié et de son volume.

Cette troisième approche correspond précisément à ce que nous recherchons expérimentalement, et sera utilisé par la suite. De ce fait, les temps de calculs sont bien moins importants, car le maillage est moins lourd (la zone représentant l'air n'est pas maillée).

### 3.2 Méthode de simulation numérique adoptée

L'étude s'effectue en deux étapes principales :

La première consiste à modéliser la scène thermique sur Comsol Multiphysics. Ces calculs nous permettent d'obtenir des champs de température sur la surface du matériau, pour chaque pas de temps avec une résolution spatiale donnée. Cette résolution spatiale et temporelle doit être plus fine que celle de la caméra choisie.

La deuxième étape consiste à exporter ces champs de températures sur un code que nous avons développé avec Matlab, qui nous permet de simuler la caméra thermique choisie. Le but est d'insérer, dans le simulateur, les paramètres de la caméra choisie, lors de la visualisation de la scène thermique au niveau des fissures (émissivités, température environnementale, IFOV, fréquence, etc ...).

Dans cette configuration, nous avons fait le choix de ne pas utiliser la symétrie du problème, pour des raisons pratiques dans notre cas, car les cartographies de températures obtenues sont ensuite utilisées pour générer des images synthétiques que la caméra thermique verrait selon les paramètres choisis (IFOV, fréquence, ...). La Figure 3 montre un exemple de géométrie et le maillage adopté, pour un matériau donné.

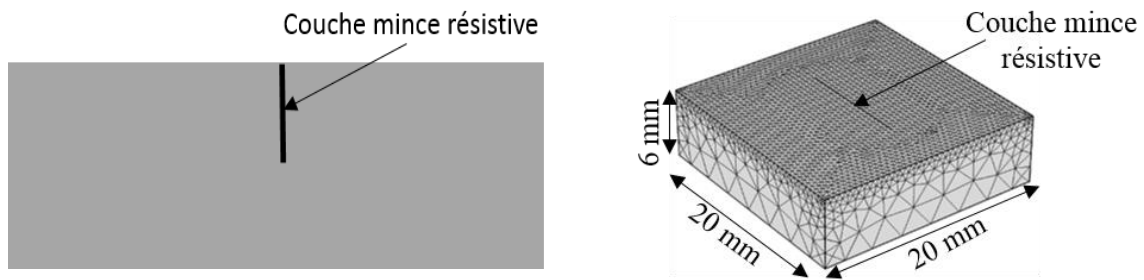


Figure 3 : Géométrie et maillage de la pièce examinée

L'équation de diffusion de la chaleur est utilisée pour résoudre ce problème. En l'absence de terme source, cette équation s'écrit sous la forme (voir équation (2)) [20].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{\rho C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Dans le modèle, nous imposons une densité de puissance  $\varphi$  (3)

$$\varphi = A \cdot P \cdot \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}} \cdot \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0-vt)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (3)$$

Un coefficient d'échange global (convection et rayonnement) est imposé à cette même surface avec  $h = 10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Pour la couche mince résistive nous, imposons une résistance thermique équivalente à celle donnée par le défaut. Toutes les autres surfaces sont considérées comme adiabatiques. Un faisceau laser ligne est utilisé pour le chauffage. Les calculs ont été réalisés avec différentes vitesses de déplacement du laser et différentes ouvertures des fissures.

## 4. Résultats

### 4.1 Profil du signal obtenu

La signature thermique du défaut est visible sur la Figure 4. Le signal aller simple présente un pic induit par la résistance thermique et un creux dû à un déficit chaleur, d'où l'appellation « signal bipolaire ». Numériquement nous pouvons constater que le fait d'effectuer un aller-retour permet de doubler le signal bipolaire obtenu.

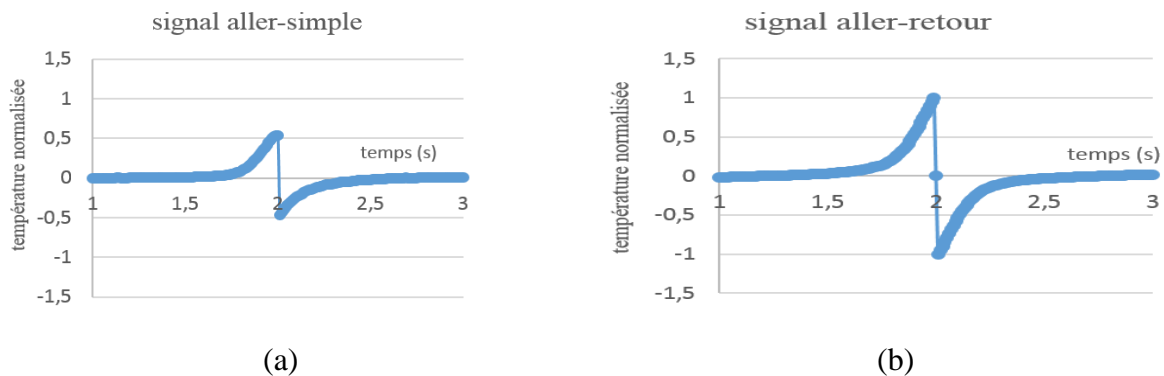


Figure 4 : Signal normalisé en aller simple(a) et aller-retour(b)

### 4.2 Comparaison des champs de température entre la simulation et les mesures expérimentales

La comparaison s'effectue au niveau des élévations maximales de températures obtenues sous le spot laser par rapport à l'état initial du matériau. Nous avons utilisé un matériau en acier avec un défaut débouchant et un autre en inox sans défaut. 5 vitesses croissantes (V1, V2, V3, V4, et V5 ; avec  $V1 < V2 < V3 < V4 < V5$ ) ont été utilisées pour ces essais.

#### 4.2.1 Cas d'un matériau sans défauts : inox

Comme illustré sur le Tableau 1, nous pouvons constater que les écarts de températures trouvées entre la simulation numérique et les mesures sont faibles, ils sont tous inférieurs 1°C. Les légères différences observées peuvent provenir des erreurs cumulées de mesures d'émissivités, de puissances, de températures environnementales, etc... L'écart relatif par rapport à l'élévation de température est inférieur à 5%.

Vitesse	Ecarts de température à la surface du matériau (°C)	Ecart relatif par rapport à l'élévation de température(%)
V1	0,5	3,8
V3	0,4	3,4
V4	0,1	1,1

Tableau 1 : Ecarts de température entre la simulation numérique et les mesures dans le cas du matériau en inox

#### 4.2.2 Cas d'un matériau avec un défaut débouchant : acier

L'élévation de la température lors du passage du laser est récupérée en deux endroits différents. Sur la surface du matériau sain (A) et juste avant le défaut (B), comme illustré sur la Figure 5. Cette dernière nous donne l'augmentation de température induite par la résistance thermique. Une puissance de 40 W est utilisée pour le chauffage.

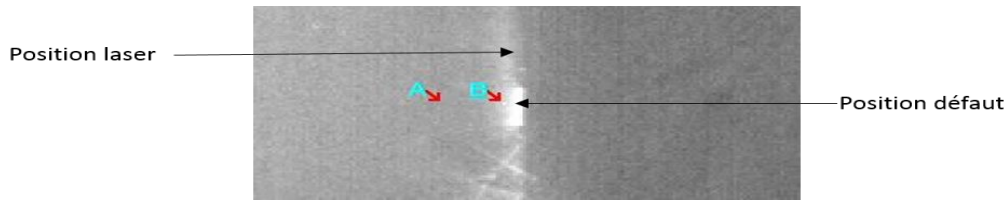


Figure 5 : position des points de mesures et ligne laser pour le post-traitement

Le Tableau 2 donne les écarts de température entre la simulation numérique et les mesures dans le cas de l'acier. Nous pouvons remarquer que les résultats numériques et expérimentaux sont du même ordre de grandeur loin du défaut et au plus près du défaut (effet résistance thermique). Nous pouvons également remarquer que les amplitudes (signature thermique du défaut) numériques et expérimentales sont du même ordre de grandeur pour les différentes vitesses. Les écarts tournent autour de 1°C ce qui correspond à une élévation de 8% lors du passage du laser.

Vitesse	Ecart de température à la surface matériau loin du défaut (°C)	Ecart relatif par rapport à l'élévation de température loin du défaut (%)		Ecart de température près du défaut (°C)	Ecart relatif par rapport à l'élévation de température près du défaut(%)
V2	2,3	17,9		0,7	4,2
V3	0,2	1,7		0,9	5,9
V5	1	10,1		0,4	3,4

Tableau 2 : écarts de température entre la simulation numérique et les mesures expérimentales dans le cas de l'acier avec un défaut débouchant

Ces différents résultats nous montrent la fiabilité du modèle numérique qui sera ensuite utilisé pour les plans d'expériences numériques.

### 4.3 Plans d'expériences numériques(PEN)

Dans cette étude, nous avons choisi les deux paramètres essentiels que sont la vitesse réduite du laser (vitesse de déplacement divisée par une vitesse de référence) et l'ouverture réduite (ouverture du défaut divisée par une ouverture de référence). Deux fonctions objectif ont été définies : l'amplitude normalisée définie par l'amplitude du signal divisée par une amplitude de référence et « l'efficacité » définie par l'équation (4). Une analyse des résultats obtenus par simulation nous permet d'établir les polynômes (voir (5) et (6)) régissant les fonctions objectif par rapports aux paramètres.

$$Ef = An. \sqrt{v^*} \quad (4)$$

$$An = 0,914 + 0.0002. O^* - 0.0185. v^* \quad (5)$$

$$Ef = 1,068 + 0.001. O^* + 0,1467. v^* - 7,1398. 10^{-7}. O^{*2} - 1,4712. 10^{-6} O^*. v^* - 0,0038 v^* \quad (6)$$

Nous pouvons remarquer sur la Figure 6a que l'amplitude réduite est d'autant plus grande pour des vitesses réduites faibles couplées avec des ouvertures réduites grandes. Nous pouvons également observer que, quelle que soit l'ouverture, les amplitudes les plus grandes sont obtenues avec des vitesses faibles. Cela est dû à une accumulation de chaleur plus importante pour des faibles vitesses. Dans la pratique, la priorité est portée sur la détection. Cependant,

pour être productif, il faudrait essayer d'adopter des vitesses pas trop petites pour être efficace, mais pas trop grande non plus pour ne pas dégrader le signal. C'est dans cette perspective que nous avons mis en place une fonction objectif nommée « efficacité ». La Figure 6b donne les plages de vitesses réduites optimales qui permettent non seulement une bonne détection mais aussi d'être efficace en terme de vitesse de déplacement. Par exemple, dans le cas étudié, la vitesse réduite optimale se trouve autour de 18.

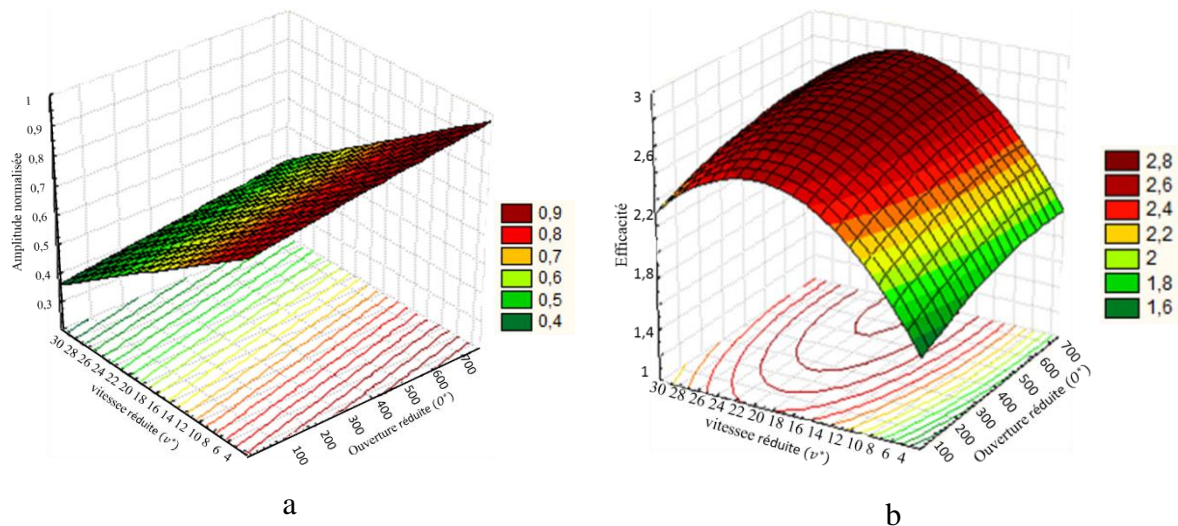


Figure 6 : influence de la vitesse de déplacement et de l'ouverture sur l'amplitude du signal bipolaire.

## 5. Conclusions

Les caractérisations expérimentales que nous avons réalisées nous ont permis d'alimenter un modèle de simulation par la méthode des éléments finis couplé avec de l'observation par thermographie infrarouge. Le modèle de couche mince résistive reste suffisant pour modéliser ce qui se passe au niveau thermique dans un défaut débouchant lors d'un scan en aller-retour. Ce procédé permet de doubler la signature thermique du défaut et d'éliminer les changements locaux d'absorptivité et/ou d'émissivité.

Les mesures réalisées ont permis de voir que les champs de températures trouvés sur un matériau sain entre la simulation et les mesures expérimentales sont quasiment identiques. Les élévations de températures induites par la résistance thermique sont également du même ordre de grandeur entre la simulation et les mesures expérimentales. Les différences observées proviennent des erreurs de mesures de la puissance, de l'émissivité du matériau, de son absorptivité ...

Le modèle numérique développé nous a permis d'effectuer les premières études par plans d'expériences numériques (PEN). Cette étude aide à avoir une idée sur l'influence de la vitesse et de l'ouverture du défaut. Elle révèle que plus la vitesse est faible, plus l'amplitude du signal devient importante. Elle montre également que l'amplitude du signal bipolaire en aller-retour évolue linéairement avec ces deux paramètres. Les PEN nous ont également permis de déterminer l'efficacité du process, c'est-à-dire les vitesses réduites optimales pour combiner une bonne détection et une rapidité d'inspection.

## Bibliographie

- [1] P. D. Chemin Pierre, «Ressuage,» Technique de l'ingénieur, 2014.
- [2] S. Graveleau et P. Chemin, «magnétoscopie- aspects théoriques et réglementaires,» Technique de l'ingénieur, 2015.
- [3] G. Gaussorgues, la thermographie infrarouge, TEC & DOC, 1999.
- [4] E. Kubiak, «Infrared detection of fatigue cracks and other near-surface defects,» *Applied Optics*, vol. 7, pp. 1743-1747, 1968.
- [5] Kaufma, I; Chang, Pan-Tze; Hsu, Hsueh-Shun; Huang, Wen-Yuan , «Photothermal Radiometric Detection and Imaging of surface cracks,» *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 6, n° %12, 1987.
- [6] Jean Luc Bodnar; M Egée, «Wear crack characterization by photothermal radiometry,» *Wear*, pp. 54-59, 1996.
- [7] J. Krapez, D. Balageas et F. Lepoutre, «Early detection by stimulated infraride thermography,» vol. 262, n° %1303 321 p, 1994.
- [8] C. Gruss, «Caméra photothermique etude théorique et réalisation pratique d'une caméra infrarouge active avec excitation laser,» Université de Poitiers, Poitiers, 1992.
- [9] S. Hermosilla-Lara, «Amélioration d'une caméra photothermique par traitements d'images adaptés à la détection de fissures débouchantes,» Ecole normale Supérieure, Cachan, 2002.
- [10] Y. Caulier et M. Taglione, «la caméra photothermique active: une technique de controle industrielle automatique en alternative au ressuage et la magnétoscopie,» 2014. [En ligne]. Available: <http://www.ndt.net/article/cofrend2014>. [Accès le 13 Janvier 2016].
- [11] J.-F. ROCH, «Analyse de données et exploitation de mesures/cours préparation à l'agrégation de physique - ENS Cachan,» Cachan, 2005.
- [12] W. Ernie, J. Albert, L. Robert et R. and John, «Solar absorbance and spectral reflectances of 12 metal for température ranging from 300 to 500K,» NASA, Washington, 1969.
- [13] T Li; D P Almond; D A S Rees, «Crack imaging by scanning laser-line thermography and laser-spot thermography,» *Measurement Science and Technology*, p. 035701 (14pp), 2011.
- [14] R. Celorrio, A. Omella et A.Mendioroz, «Advances in cracks characterization by lock-in infrared thermographie,» *Int J Thermophys*, pp. DOI 10.1007/S 10765-014-1676-3, 2014.
- [15] P. Broberg , «Surface crack detection in wilds using thermography,» *NDT&E International*, pp. 69-73, 2013.
- [16] J. L. Bodnar, «Radiometrie photothermique appliquee a la detection et a la caracterisation de fissures,» thèse de doctorat université Reims Champagne Ardenne, Reims, 1993.
- [17] J. Schlichting, Ch. Maierhofer, M. Kreutzbruck, «crack sizing by laser excited thermography,» *NDT&E international*, pp. 133-140, 2012.
- [18] V.Vavilov, «modeling thermal NDT problems,» *International journal of heat and mass transfer*, pp. 75-86, 2014.
- [19] A.Elballouati; S.Belattar, «Finite Element Method Applied To Thermal Nondestructive Characterization Of Delamination In The Dam Structure,» 17th World Conference on Nondestructive Testing Shanghai, China, 2008.
- [20] Carslaw, Conduction of Heat in Solids, Oxford,UK: Oxford Univ Press, 1959.

## Remerciements

Nous remercions BPI France et la région de Bourgogne pour le financement accordé dans le cadre du projet ATHENA, ainsi que le PNB pour la labellisation du projet.