

Structural Health Monitoring (SHM) des structures en béton armé par la thermographie infrarouge avec micro-ondes : détection de l'enrobage d'armatures par approche de transmission

Sam Ang Keo^{1,*}, Franck Brachelet², Didier Defer²

¹ Cerema, Equipe de recherche ENDSUM, 23 Avenue Amiral Chauvin, 49130 Les Ponts-de-Cé, France
sam-ang.keo@cerema.fr

² Univ. Artois, IMT Nord Europe, Junia, Univ. Lille, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), F-62400 Béthune, France
franck.brachelet@univ-artois.fr, didier.defer@univ-artois.fr

*Correspondance: keo_samang@yahoo.com

RESUME

Cet article propose une méthodologie innovante avec la thermographie micro-ondes qui permet de déterminer l'épaisseur du béton d'enrobage d'une couche d'armatures (12 mm de diamètre régulièrement placés à 10 cm) dans un mur en béton armé (1 m x 1 m x 6,5 cm). La méthodologie est divisée en sept étapes. De la première à la quatrième étape, l'expertise des méthodes de thermographie infrarouge est appliquée. Dans la première étape, cinq campagnes expérimentales avec la thermographie micro-onde sont réalisées avec cinq angles de direction de l'antenne (correspondant aux angles des ondes incidentes): 0° (direction normale de l'antenne), 15°, 30°, 45° et 60°. De l'étape cinq à l'étape sept qui est la dernière étape, la combinaison d'une loi physique (Snell-Descartes) et d'une méthode d'analyse mathématique (loi linéaire) est nécessaire. En utilisant l'approche par transmission (la caméra infrarouge et l'antenne sont situées dans différent côté par rapport au mur détecté), la méthodologie proposée amène à déduire la valeur approchée de l'épaisseur du béton d'enrobage qui est très proche (2% d'écart) de la valeur réelle (3,8 cm), l'espacement des barres d'acier et aussi la constante diélectrique du béton. La détection de l'épaisseur d'enrobage béton est une autre nouvelle réalisation remarquable parmi toutes les applications utilisant la thermographie infrarouge.

Mots-clés : Structural health monitoring (SHM); Evaluation non destructive (END); Thermographie infrarouge; Micro-ondes; Béton armé; Enrobage

I. INTRODUCTION

Le béton d'enrobage est un paramètre essentiel à prendre en compte pour la surveillance de l'état des structures (SHM). Pour cette raison, plusieurs études sur le béton d'enrobage ainsi que le

développement de différentes méthodes d'évaluation non destructive (END) pour détecter ce paramètre ont été faites [Dérobert et al., 2008]. Parmi les méthodes END développées, la thermographie infrarouge est une technique de mesure de la température basée sur le transfert de chaleur par rayonnement thermique. En se basant sur la mesure de la différence de température à la surface des matériaux ou des structures, elle permet de détecter la présence de problèmes, de défauts ou de variation des propriétés de conduction thermique sous la surface [Maldague, 2001]. Le développement des méthodes de thermographie infrarouge active s'est accompagné du développement des méthodes d'interprétation et de techniques de stimulation adoptées (systèmes d'excitation telles que lampes halogènes, laser CO₂, et micro-ondes) [Keo, 2013] pour plusieurs applications telles que la détection d'un élément métallique derrière une plaque de bois [Keo et al., 2014b], détection de défaut dans le renforcement avec composite (CFRP) [Keo et al., 2015, 2013a, 2013b, Bu et al., 2020] et le défaut dans le matériau biomédical [Dragan et al., 2013], ainsi que la détection des barres d'acier dans un mur en béton armé [Keo et al., 2014a, Szymanik et al., 2016]. L'excitation micro-onde présente un grand intérêt du fait de son échauffement volumétrique, avec une profondeur de pénétration des ondes qui dépend notamment de la constante diélectrique du matériau détecté [Hong et Buyukozturk, 1998]. Cet avantage permet la visualisation de barres d'acier dans une structure en béton armé pendant la phase de chauffage. Cependant, l'estimation de l'épaisseur du béton d'enrobage (quantitative) par cette méthode, notamment en phase d'échauffement, n'est pas encore accessible. L'analyse détaillée et les discussions des phénomènes physiques, appelés *diffraction* et *interférence*, affectant les thermogrammes lors de la détection des barres d'acier par la thermographie micro-ondes ont donné une piste essentielle conduisant à résoudre ce problème. Comme résultats de l'étude, les effets des ondes incidentes sur les thermogrammes dans les deux approches de détection (réflexion et transmission) ont également été clarifiés par [Keo et al., 2019]. Sur les thermogrammes dans l'approche par réflexion, les parties du béton dans les zones des ondes réfléchies sont plus chaudes que les autres zones alors que les fractions dans les zones de superposition des ondes (interférence des ondes) sont plus chaudes que les autres zones dans l'approche par transmission [Keo et al., 2019].

La présente étude présente une méthodologie innovante pour déterminer l'épaisseur du béton d'enrobage des armatures (monocouches) dans un mur en béton par la thermographie micro-ondes. Dans la méthodologie, l'approche par transmission (la caméra infrarouge et la source des micro-ondes sont placées dans différents côtés par rapport à l'éprouvette détectée) est utilisée. C'est une méthodologie physique et mathématique car elle dépend d'une loi physique appelée *Snell-Descartes* et de la *fonction linéaire* d'une relation non linéaire entre les ondes incidentes et les décalages déduits des profils de température. Les profils de température sont obtenus à partir des thermogrammes de l'approche par transmission avec différentes ondes incidentes. Les détails de la méthodologie sont expliqués dans la partie suivante de l'article. A l'issue de la méthodologie, les valeurs de la constante diélectrique et de l'épaisseur du béton d'enrobage sont déduites. C'est un résultat remarquable de l'application de la *loi physique* et de l'*analyse mathématique* à la détection d'objets enfouis par la méthode de thermographie infrarouge.

II. METHODOLOGIE

Le principe de la méthodologie proposée est illustré par un organigramme comme montré dans la Fig. 1. La méthodologie est divisée en sept étapes. De la première à la quatrième étape, l'expertise des méthodes de thermographie infrarouge est appliquée. Dans la *première étape*, cinq campagnes expérimentales avec la méthode de thermographie micro-ondes sont réalisées avec cinq angles d'ondes incidentes (θ_i): 0° (direction normale de l'antenne micro-ondes), 15° , 30° , 45° , et 60° . Dans la *deuxième étape*, les thermogrammes sont obtenus à partir de tous les essais sur un mur en BA. Ensuite, un thermogramme à un instant doit être sélectionné pour chaque direction de l'antenne. Les critères de sélection du thermogramme reposent sur le fait que le contraste thermique soit optimal afin que le profil de température correspondant, à tracer dans la troisième étape, donne des pics nets. Plusieurs choix sont possibles, mais le thermogramme sélectionné doit être en phase d'échauffement pour éviter une diminution du contraste thermique sur le thermogramme due à la conduction thermique dans les matériaux détectés. Tous les profils horizontaux (suivant l'axe horizontal) de température de surface pour tous les θ_i sont tracés sur les mêmes axes pour faciliter la déduction des valeurs de décalages des pics sur les profils de température (par rapport au cas de la direction normale) dans la *quatrième étape*.

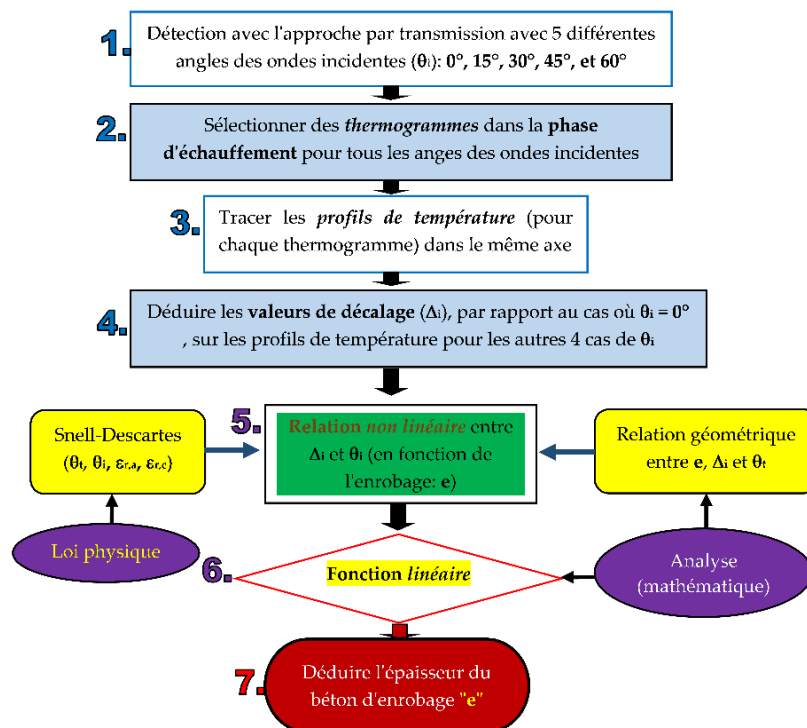


FIGURE 1. Méthodologie pour détecter l'épaisseur du béton d'enrobage des armatures (monocouches) dans un mur BA par la thermographie micro-ondes (*approche par transmission*)

La valeur de décalage (Δ_i) pour le cas de 15° de l'angle de l'onde incidente ($\theta_i = 0^\circ$) est mesurée à partir de pics de son profil de température jusqu'aux pics du profil de température pour le cas des ondes incidentes normales. La même manière de mesure est utilisée pour obtenir les valeurs de décalage pour les autres cas d'angles d'onde incidente. Il convient de noter que les décalages (Δ_i) sont générés par l'effet de réfraction des ondes après avoir atteint la couche des armatures à l'intérieur du mur en BA détecté. De l'étape cinq à l'étape sept qui est la dernière étape, une *combinaison d'une loi physique* et d'une méthode d'analyse *mathématique* est nécessaire. À l'étape cinq,

une relation non linéaire entre θ_i et Δ_i est créée en utilisant la loi de Snell-Descartes et la relation géométrique entre les Δ_i , les angles des ondes transmises dans le béton (θ_t) et l'épaisseur du béton d'enrobage cherché (e).

La théorie de Snell-Descartes donne la relation entre les ondes incidentes et les ondes réfractées comme l'équation suivante:

$$\sqrt{\varepsilon_1} \times \sin \theta_i = \sqrt{\varepsilon_2} \times \sin \theta_t \quad (1)$$

Où ε_1 est la constante diélectrique du milieu 1, ε_2 est la constante diélectrique du milieu 2, θ_i est l'angle des ondes incidentes dans le milieu 1, et θ_t est l'angle des ondes transmises dans le milieu 2. Dans notre étude, le milieu 1 est l'air, et le milieu 2 est le béton. La constante diélectrique de l'air est égale à 1 ($\varepsilon_1 = 1$). La relation géométrique entre Δ_i , θ_t et l'enrobage (e) peut être illustrée dans la Fig. 2. Les fractions des ondes réfractées (avec l'angle transmis θ_t) autour d'une barre d'acier peuvent être simplifiées comme montrées dans cette figure.

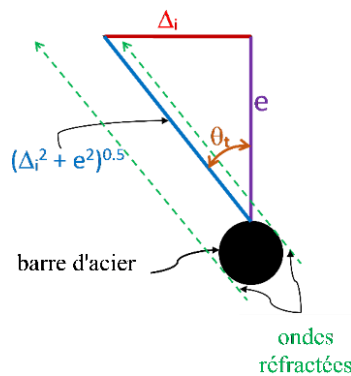


FIGURE 2. Schéma simplifié des ondes réfractées autour d'une barre d'acier

En appliquant le théorème de Pythagore et la formule trigonométrique au schéma simplifié des ondes réfractées dans la Fig. 2, on obtient l'équation suivante:

$$\sin \theta_t = \frac{\Delta_i}{\sqrt{\Delta_i^2 + e^2}} \quad (2)$$

La combinaison des équations (1) et (2) donne l'équation:

$$\frac{(\sin \theta_i)^2}{\varepsilon_2} = \frac{\Delta_i^2}{\Delta_i^2 + e^2} \quad (3)$$

En supposant que $X = (\sin \theta_i)^2$ et $Y = \Delta_i^2$, l'équation (3) devient:

$$X \times Y + e^2 \times X = \varepsilon_2 \times Y \quad (4)$$

L'équation (4) est la relation non linéaire dans laquelle il y a l'enrobage (e) comme un paramètre constant à déterminer. En divisant cette équation non linéaire par X , on obtient son autre forme:

$$Y = \varepsilon_2 \times \left(\frac{Y}{X}\right) - e^2 \quad (5)$$

Dans la méthodologie proposée, l'équation non linéaire (des variables X et Y) doit être convertie en une équation linéaire (l'étape 6). En supposant que $x = \frac{Y}{X}$ and $y = Y$, l'équation (5) devient:

$$y = \varepsilon_2 \times x - e^2 \quad (6)$$

Cette dernière équation est une fonction linéaire avec ε_2 comme constant de gradient, et le carré de l'enrobage (e^2) à trouver. L'épaisseur d'enrobage (e) peut être donc déduite (à l'étape finale de la méthodologie) à partir de la droite qui représente l'équation linéaire (6). Sachant que deux éléments

essentiels permettant de détecter l'enrobage avec la méthodologie proposée sont: l'angle des ondes incidentes (θ_i) et les valeurs de décalage des pics sur les profils de température (Δt_i).

L'application de la loi linéaire à la fonction non linéaire (X, Y) afin d'obtenir la fonction linéaire (x, y) peut être illustrée dans la Fig. 3. L'action dans la dernière étape de la méthodologie est donc de trouver l'équation représentant la fonction linéaire relation (x, y) pour déduire la valeur de A et celle de B .

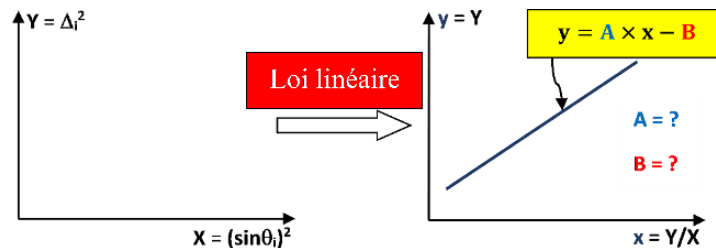


FIGURE 3. Application de la loi linéaire (x, y) pour la relation non linéaire (X, Y)

III. CAMPAGNE EXPERIMENTALE

L'éprouvette utilisée pour les essais est un mur en béton armé, de dimensions 1 m x 1 m et de 6,5 cm d'épaisseur, coulée avec la proportion *eau/ciment/sable/gravier* de 1:1,6:4,45:4,7 (en poids). Les armatures sont des barres d'acier de 12 mm de diamètre, placées régulièrement à tous les 10 cm d'espacement. Les armatures étant monocouches, il y a deux valeurs d'épaisseur d'enrobage: 3,8 cm et 1,5 cm. L'éprouvette a été soumise aux essais à l'âge de 3 mois. Le dispositif expérimental des essais est présenté dans la Fig. 4.

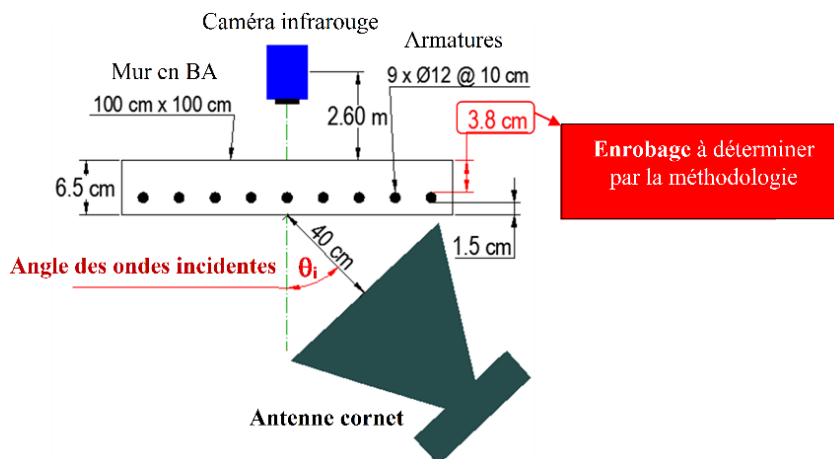


FIGURE 4. Dispositif expérimental de la détection de mur en BA par la thermographie micro-ondes avec l'approche par transmission

Une caméra infrarouge FLIR à longueur d'onde de 3 à 5 μ m, avec un détecteur matriciel de 320 x 256 en InSb (antimonite d'indium), a été placée à une distance de 2,6 m du mur dans la direction normale, de manière à pouvoir détecter toute la surface entière du mur à chauffer par micro-ondes. Les micro-ondes utilisées pour les essais ont une fréquence de 2,45 GHz et ont été guidées vers l'éprouvette par une antenne cornet pyramidal avec une ouverture de 40°, un gain de 21,67 dB dans sa direction principale et des dimensions de 59 cm x 56 cm. L'éprouvette a été placée à 40 cm de

l'ouverture de l'antenne. Cinq essais ont été effectués pour cinq directions d'antenne correspondant aux angles des ondes incidentes (θ_i): 0° (direction normale de l'antenne), 15° , 30° , 45° , et 60° . Les thermogrammes ont été enregistrés à intervalles réguliers (1 image par seconde). L'éprouvette a été chauffée avec une puissance moyenne de 600 W pendant 5 min.

Il est essentiel de noter que l'épaisseur d'enrobage déduite de la méthodologie (avec l'approche par transmission) se situe derrière la couche des armatures, et non celle exposée à l'antenne. L'utilisation de la *direction normale de la caméra infrarouge* est un avantage pour l'approche par transmission (par rapport à celle par réflexion) qui peut donner des *dimensions réelles* sur les thermogrammes.

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Détermination des valeurs de décalage des pics (Δi) à partir des thermogrammes

La sélection des thermogrammes (comme expliquée dans la partie de la méthodologie) est très importante dans la procédure de détermination des Δi . Un thermogramme sélectionné à partir de la détection du mur avec l'angle des ondes incidentes (ou direction de l'antenne) $\theta_i = 30^\circ$ (à l'instant 288 s) est présenté dans la Fig. 5.

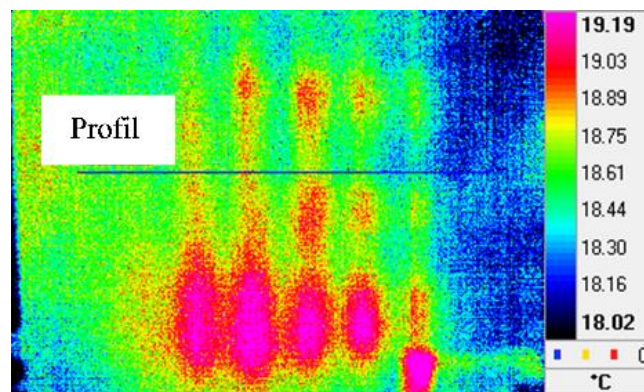


FIGURE 5. Thermogramme à 288 s quand $\theta_i = 30^\circ$

Afin d'obtenir des profils de température pour déterminer les valeurs des décalages, un segment horizontal (de même dimension) est placé à la même position sur tous les thermogrammes. Les profils de température obtenus pour tous les angles des ondes incidentes ($\theta = \theta_i$) sont présentés dans la Fig. 6. L'axe horizontal correspond à la dimension (la longueur) du mur BA détecté. Sur cet axe, on peut voir l'espacement des pics inférieurs du profil de température pour le cas de ($\theta_i = 0^\circ$) est de 10 cm (ce qui correspond à l'espacement des barres d'acier dans le mur).

Afin de déduire les valeurs des décalages, les pics inférieurs (qui correspondent aux positions réelles des barres d'acier dans le cas où la direction normale de l'antenne est utilisée) des profils de température doivent être définis. Cependant, les formes des profils de température ne facilitent pas la détermination des positions des pics. Pour cette raison, des courbes d'ajustement pratiques ont été nécessaires pour tous les profils de température. Dans notre étude, une moyenne mobile avec une période de 5 (la somme des températures sur 5 pics de petites impulsions divisée par 5) a été utilisée. D'autres fonctions d'ajustement (telles que linéaire, exponentielle, logarithmique,

polynomiale et puissance) ont également été essayées, mais la moyenne mobile donne les meilleures courbes d'ajustement. D'autres périodes (3, 4 et 6) ont également été essayées mais la période 5 donne les meilleures courbes d'ajustement. Après l'application de la moyenne mobile, les courbes ajustées des profils de température pour tous les angles des ondes incidentes sont représentées dans la Fig. 6.

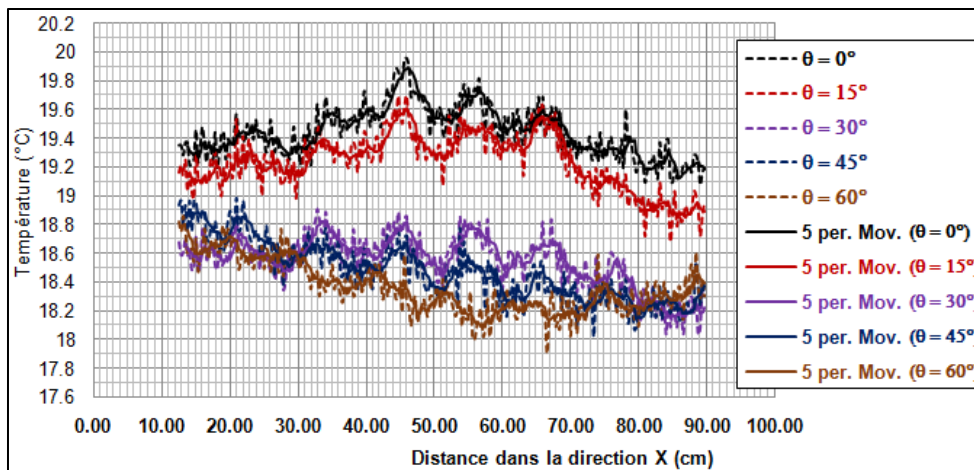


FIGURE 6. Profils de température avec courbes d'ajustement en utilisant la moyenne mobile pour différents angles d'ondes incidentes ($\theta = \theta_i$)

Comme il n'y a pas d'effet de la direction de la caméra infrarouge, le profil de température pour le cas de la direction normale de l'antenne (angle des ondes incidentes égal à zéro) peut être utilisé pour déduire la position et l'espacement des barres d'acier à l'intérieur du mur BA. Comme décrit dans l'étape 4 de la méthodologie, la valeur de décalage pour une onde incidente est déduite en mesurant la distance à partir des pics de son profil de température aux pics du profil de température pour le cas des ondes incidentes normales (cas référent).

B. Déduction de l'épaisseur du béton d'enrobage (e)

Après la détermination des valeurs des décalages de pics des profils de température, les autres valeurs nécessaires pour tracer le graphique (x, y) sont déduites et présentées dans le Tableau 1.

TABLEAU 1. Valeurs pour tracer la fonction linéaire (x, y)

θ_i (°)	$X = (\sin\theta_i)^2$	$y = Y = \Delta_i^2(\text{mm}^2)$	$x = Y/X (\text{mm}^2)$
0	0	0	0
15	0.067	25	373.205
30	0.250	100	400
45	0.500	210.25	420.5
60	0.750	3600	4800 *

* Trop élevée par rapport à la valeur moyenne de x

La valeur de x lorsque $\theta_i = 60^\circ$ est trop élevée par rapport à la valeur moyenne. Pour cette raison, ce point n'est pas pris pour déterminer l'équation de la fonction linéaire. Cela peut aussi permettre de savoir que cette direction de l'antenne peut être trop grande pour la détection du fait de contrainte liée à des dimensions de l'antenne. En utilisant les valeurs dans le Tableau 1, le graphique de la fonction linéaire (x, y) est obtenu (avec $R^2 = 0.965$) comme montré dans la Fig. 7.

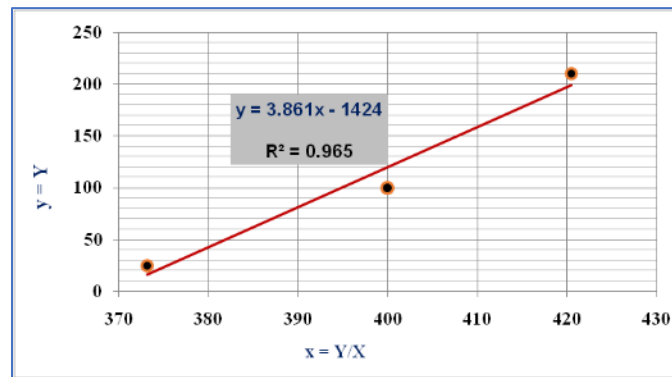


FIGURE 7. Graphique de la fonction linéaire (x, y) pour déduire la valeur de l'épaisseur d'enrobage

Selon l'équation " $y = 3.861 \times x - 1424$ " et l'équation (6), les valeurs de " ϵ_2 " et de " e " peuvent être déduites comme suit: $\epsilon_2 = 3.861 \approx 4$. $e^2 = 1424 \Rightarrow e = \sqrt{1424} = 37.7 \text{ mm}$

Par conséquent, la valeur déduite de l'épaisseur d'enrobage par la méthodologie proposée (37,7 mm) est acceptable par rapport à la valeur réelle (38 mm).

V. CONCLUSION

Dans cette étude, une méthodologie innovante avec la thermographie micro-ondes pour déterminer l'épaisseur du béton d'enrobage des armatures (monocouches) dans un mur en BA est proposée. En utilisant l'approche par transmission avec cinq angles de direction d'antenne micro-ondes, la loi de *Snell-Descartes* (physique) et la *loi linéaire* (mathématique), la méthodologie conduit à déduire la valeur approximative de l'épaisseur du béton d'enrobage. L'enrobage détecté par cette méthode se trouve derrière la couche d'armatures (pour le cas d'une seule couche d'armatures). Cette méthodologie élargit la frontière de la méthode de thermographie infrarouge qui est une méthode simple et sans contact mais capable de détecter l'épaisseur du béton d'enrobage.

Les perspectives du présent travail peuvent être l'application de l'approche par réflexion, en tenant compte de la direction de la caméra infrarouge, qui sera plus compliquée, pour détecter l'enrobage faisant face à l'ouverture de l'antenne.

REFERENCES

Bu, C.; Liu, G.; Zhang, X.; Tang, Q. (2020). Debonding Defects Detection of FMLs Based on Long Pulsed Infrared Thermography Technique. *Infrared Phys. Technol.* 2020, 104, 103074.

<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103074>

Dérobot, X.; Iaquina, J.; Klysz, G.; Balyssac, J.-P. (2008). Use of Capacitive and GPR Techniques for the Non-Destructive Evaluation of Cover Concrete. *NDT E Int.*, 41, 44–52.

<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2007.06.004>

Dragan, R.G., Rosca, I.-C., Keo, S.-A., Breaban, F. (2013). Active thermography method using an CO2 laser for thermal excitation, applied to defect detection in bioceramic materials. *The 2013 E-Health and Bioengineering Conference (EHB)*, IEEE, IASI, Romania, pp. 1–4.

<https://doi.org/10.1109/EHB.2013.6707235>

Hong, C.R., Buyukozturk, O. (1998). Electromagnetic Properties of Concrete at Microwave Frequency Range. *ACI Materials Journal*, 95, 262–271.

Keo, S.A. (2013). Développement d'une méthode de thermographie infrarouge active par excitation micro-ondes appliquée au contrôle non destructif. *Thèse de doctorat*. Université d'Artois, Béthune, France.

Keo, S.A., Brachelet, F., Breaban, F., Defer, D. (2015). Defect detection in CFRP by infrared thermography with CO2 Laser excitation compared to conventional lock-in infrared thermography. *Composites Part B: Engineering*, 69, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.09.018>

Keo, S.A., Brachelet, F., Breaban, F., Defer, D. (2014a). Steel detection in reinforced concrete wall by microwave infrared thermography. *NDT & E International*, 62, 172–177. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.12.002>

Keo, S.-A., Brachelet, F., Breaban, F., Defer, D. (2013a). Development of an Infrared Thermography Method with CO2 Laser Excitation, Applied to Defect Detection in CFRP. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 7, 5.

Keo, S.A., Brachelet, F., Defer, D., Breaban, F. (2014b). Defects detection by infrared thermography with a new microwave excitation system. *Mechanics & Industry*, 15, 509–516. <https://doi.org/10.1051/meca/2014054>

Keo, S.-A., Defer, D., Breaban, F., Brachelet, F. (2013b). Comparison between Microwave Infrared Thermography and CO2 Laser Infrared Thermography in Defect Detection in Applications with CFRP. *MSA*, 04, 600–605. <https://doi.org/10.4236/msa.2013.410074>

Keo, S.-A., Yune, C.-Y., Dragan, R.G., Defer, D., Breaban, F. (2019). Analysis of effects of diffraction and interference on detection by microwave thermography. *J Civil Struct Health Monit*, 9, 153–167. <https://doi.org/10.1007/s13349-019-00329-8>

Maldague, X.P.V. (2001). Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. *Wiley series in microwave and optical engineering*. Wiley, New York.

Szymanik, B.; Frankowski, P.; Chady, T.; John Chelliah, C. (2016). Detection and Inspection of Steel Bars in Reinforced Concrete Structures Using Active Infrared Thermography with Microwave Excitation and Eddy Current Sensors. *Sensors*, 16, 234. <https://doi.org/10.3390/s16020234>