

Mesure multi-physique CIN-EF/TIR pour le recalage de paramètres matériaux : construction d'un dialogue essai/calcul robuste

T. Sentagne^{1,2}, C. Simond¹, J.E. Dufour², R. Fouque¹, J.N. Périé²

¹ DGA TA (Direction Générale de l'Armement Techniques Aérospatiales), Balma, France, theo.sentagne@def.gouv.fr

² ICA (Institut Clément Ader - Université de Toulouse, CNRS/INSA/Mines Albi/UT3/ISAE), Toulouse, France

Résumé — Un formalisme de couplage CIN-EF/TIR par calibrage bayésien photogrammétrique est proposé pour acquérir des champs mécaniques et thermiques. Appliqué à un essai de traction sur acier 304L, il permet un recalage robuste des paramètres d'une loi thermo-élasto-plastique via FEMU-W en minimisant une fonctionnelle multi-physique basée sur les mesures de champ cinématique et thermique, ainsi que sur les mesures des forces de réaction. Cette approche semble confirmer l'intérêt des mesures couplées pour une caractérisation plus précise et économique des matériaux.

Mots clés — Identification, FEMU, Multi-physique, Mesure de champ, Bayésien

1 Introduction

La simulation numérique occupe aujourd'hui une place centrale dans les processus de conception et de certification des systèmes mécaniques, offrant une alternative économique aux campagnes expérimentales traditionnelles. Cependant, cette transition vers une ingénierie pilotée par la simulation repose sur une connaissance précise et fiable des propriétés des matériaux, dont les lois de comportement deviennent de plus en plus complexes. En l'absence de données matériaux directement exploitables, l'identification des paramètres constitutifs s'appuie souvent sur des essais de caractérisation répétitifs et coûteux. Dans ce contexte, l'optimisation des phases amont de caractérisation apparaît comme un levier essentiel pour renforcer la robustesse et l'efficacité des approches numériques. Deux axes majeurs émergent pour répondre à ce défi :

- l'exploitation de mesures de champs multi-physiques, permettant de capturer des réponses mécaniques et thermiques spatialement riches, bien au-delà des informations locales fournies par les capteurs classiques (jauges, thermocouples)
- l'amélioration du dialogue essai/calcul, afin de faciliter l'intégration des données expérimentales dans des méthodes itératives de recalage de paramètres matériaux.

Ce travail s'inscrit dans cette double perspective en proposant un formalisme pour une méthode de mesure de champ couplée, associant la Corrélation d'Images Numériques par Éléments Finis (CIN-EF) et la Thermographie InfraRouge (TIR). Cette méthodologie sera mise en œuvre sur un essai de traction uniaxiale d'un acier inoxydable, avec pour objectif l'identification d'une loi thermo-élasto-plastique via *Finite Element Method Updating Weighted* (FEMU-W).

2 La mesure de champ multi-physique

2.1 Les mesures de champ

Les mesures de champ [3] constituent une source d'information indispensable pour améliorer la qualité des données obtenues lors des essais, grâce à leur richesse spatiale, qui les différencie nettement des mesures locales (jauges, thermocouples, etc.). Parmi ces techniques, on retrouve la (Stéréo) Corrélation d'Images Numériques ((S)CIN) et la Thermographie Infra-Rouge (TIR).

La (S)CIN est une mesure surfacique, optique et non intrusive, utilisant une ou plusieurs caméras pour filmer la surface d'un objet recouvert d'un mouchetis. En exploitant l'hypothèse de conservation des niveaux de gris [4], cette méthode permet de retracer les déplacements surfaciques durant une sollicitation mécanique. Le principe repose sur la minimisation de l'erreur de niveau de gris entre une image de

référence f et une image déformée g , selon :

$$F(\underline{u}) = \int_S [f(\underline{x}) - g(\underline{x} + \underline{x}(\underline{x}))]^2 d\underline{x}. \quad (1)$$

Une fois F minimisée, \underline{u} correspond au champ de déplacement mesuré.

La thermographie infrarouge (TIR) se base sur la capture du rayonnement infrarouge émis par une scène, converti en luminance L , puis en température T . Bien que non intrusive, la TIR ne permet pas un suivi lagrangien des champs thermiques, ce qui complexifie l'analyse quantitative des variations de température dans un matériau en mouvement ou en déformation.

2.2 Couplage de mesure multi-physique

La littérature montre que la CIN peut être couplée à la TIR pour obtenir un champ de mesure thermo-mécanique [7]. Ce couplage est particulièrement intéressant pour la caractérisation de lois de comportement complexes, car il offre un accès à de nouvelles sources d'information et un levier de régularisation pour le recalage de paramètres matériaux via des algorithmes itératifs.

2.2.1 Méthodes de couplage multi-physique

Dans ces travaux, le couplage est réalisé en disposant une caméra thermique entre deux caméras visibles pour la CIN [1] comme présenté en Fig. 1. Cette configuration permet de visualiser la même face de mesure et limite le nombre d'hypothèses fortes dans l'épaisseur. La mesure par CIN permet d'obtenir un champ de déplacement, projeté par la suite dans l'espace de l'imageur thermique pour suivre les points de mesure dans le spectre thermique.

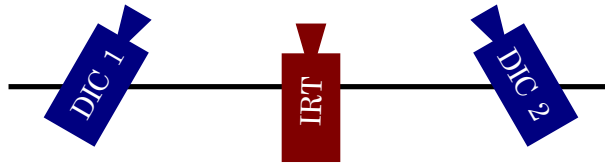


FIGURE 1 – Schématisation du capteur de mesure multi-physique

2.2.2 Calibrage photogrammétrique bayésien multi-physique

Un aspect critique du couplage des mesures multi-physiques réside dans le calibrage spatial des systèmes optiques. Ce processus permet de déterminer les positions relatives des capteurs ainsi que les caractéristiques optiques intrinsèques à chaque caméra. Le calibrage s'appuie sur l'identification des paramètres d'un modèle de projection P , combinant des composantes extrinsèques et intrinsèques, afin d'établir une correspondance entre l'espace physique tridimensionnel et les plans images bidimensionnels.

La procédure de calibrage s'appuie une mire multi-spectrale (non détaillée dans ce résumé) dont les dimensions géométriques connues *a priori* servent de référence métrologique. L'optimisation des paramètres du modèle repose sur la minimisation d'une fonctionnelle d'erreur quadratique définie par :

$$C(X, Y, Z, p) = \sum_{c=1}^{n_c} \sum_{i=1}^{n_{\text{pos}}} \sum_{j=1}^{n_p} \left\| P_{c,i}(X_j, Y_j, Z_j) - \begin{bmatrix} \hat{u}_{c,i,j} \\ \hat{v}_{c,i,j} \end{bmatrix} \right\|_{\mathcal{W}}^2, \quad (2)$$

où n_c , n_{pos} et n_p correspondent respectivement au nombre de caméras, de positions de calibrage et de points par mire. $P_{c,i}$ désigne le modèle de projection de la caméra c pour la position i de la mire, transformant les coordonnées physiques (X_j, Y_j, Z_j) du point j en coordonnées image $[u, v]^T$. Les termes $\hat{u}_{c,i,j}$ et $\hat{v}_{c,i,j}$ représentent les coordonnées pixels mesurées du point j dans l'image acquise par la caméra c pour la position i de la mire. $\|\cdot\|_{\mathcal{W}}$ désigne la norme pondérée par la matrice $\underline{\mathcal{W}}$, inverse de la matrice de covariance des erreurs de détection.

$\underline{\mathcal{W}}$ permet donc la pondération des contributions de chaque caméra, pour l'identification des paramètres p , par les incertitudes de mesure spécifiques à chaque capteur. Cette démarche permet de tenir compte des différences de sensibilité spectrale et spatiale entre les caméras visibles (pour la CIN) et thermiques (pour la TIR).

2.2.3 Incertitudes associées au calibrage

L'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) [6] est utilisé pour minimiser la fonctionnelle de calibrage. À convergence, la matrice de covariance des paramètres p est donnée par [2] :

$$\underline{\Sigma}_p = (\underline{J}^T \underline{\mathcal{W}} \underline{J})^{-1}, \quad (3)$$

où J est la jacobienne du problème. L'incertitude sur les paramètres $\underline{\sigma}_p$ est extraite de la diagonale de $\underline{\Sigma}_p$.

2.2.4 Mesure multi-physique

Après avoir réalisé le calibrage spatial (section 2.2.2), la mesure thermo-cinématique peut être effectuée en exploitant une approche CIN-EF (Corrélation d'Images Numériques couplée aux Éléments Finis). Le champ de déplacement optimal \underline{u}^* est alors déterminé par minimisation de la fonctionnelle variationnelle :

$$\underline{u}^* \in L^2(S, \mathbb{R}^3), \quad \underline{u}^* = \underset{\underline{u}}{\operatorname{argmin}} F(\underline{u}). \quad (4)$$

Une fois le champ de déplacement \underline{u}^* identifié, les points de mesure — correspondant aux nœuds du maillage EF — subissent une transformation mécanique $\phi_{\underline{u}}(\underline{x}) = \underline{x} + \underline{u}(\underline{x})$. Ces points transformés sont ensuite projetés dans l'espace image de la caméra thermique à l'aide du modèle caméra P_{th} . Les valeurs de luminance, exprimées en niveaux numériques (Digital Level, DL), sont extraites de l'image thermique g_{th} selon la relation :

$$\underline{D} = g_{\text{th}} \circ P_{\text{th}} \circ \phi_{\underline{u}}(\underline{x}), \quad (5)$$

où D représente les valeurs en DL aux points de mesure advectés.

La conversion des niveaux numériques D en luminance énergétique mesurée L_{mes} s'effectue grâce à la réponse spectrale du capteur, préalablement caractérisée lors de la phase de calibrage thermique. Sous les hypothèses suivantes :

- la surface observée est totalement opaque (absence de rayonnement par transmission),
- la caméra observe la surface selon une direction fronto-parallèle,
- la surface se comporte comme un radiateur lambertien et un diffuseur orthotrope,
- la distance de travail est courte (i.e. pas d'absorption atmosphérique),

il suffit d'itérer sur \underline{T}_0 dans Eq. 6, afin de trouver la température réelle observée à la surface de l'objet :

$$L(\underline{T}_0) = \int_{\Delta_\lambda} \left[\varepsilon_0(\lambda) L(\underline{T}_0, \lambda) + (1 - \varepsilon_0(\lambda)) \bar{\varepsilon}_c L(T_c, \lambda) \right] d\lambda \quad (6)$$

avec Δ_λ la bande spectrale d'intérêt, ε_0 l'émissivité spectrale de la surface observée, L la fonction de luminance spectrale d'un corps noir selon la loi de Planck, T_c la température de corps environnant la surface observée, $\bar{\varepsilon}_c$ l'émissivité moyenne sur la bande spectrale Δ_λ , T_{atm} la température de l'atmosphère entre la caméra et la surface observée et pour finir \underline{T} le vecteur de température recherchée aux points de mesure.

3 Identification d'une loi thermo-elasto-plastique par FEMU-W

3.1 Protocole expérimental et conditions d'essai

Un essai a été réalisé sur une éprouvette percée en acier inoxydable 304L présentant une épaisseur de $e = 1$ mm, une longueur travaillante de $L = 180$ mm, une largeur de $l = 47$ mm et un diamètre d'alésage central de $d = 20$ mm. Le banc d'essai utilisé est présenté en Fig. 2. La vitesse de traction a été fixée à $v_t = 5$ mm/min, valeur déterminée empiriquement afin d'obtenir un compromis optimal entre :

- une élévation de température mesurable de l'éprouvette,
- une fréquence d'acquisition compatible avec les capacités du système de mesure.

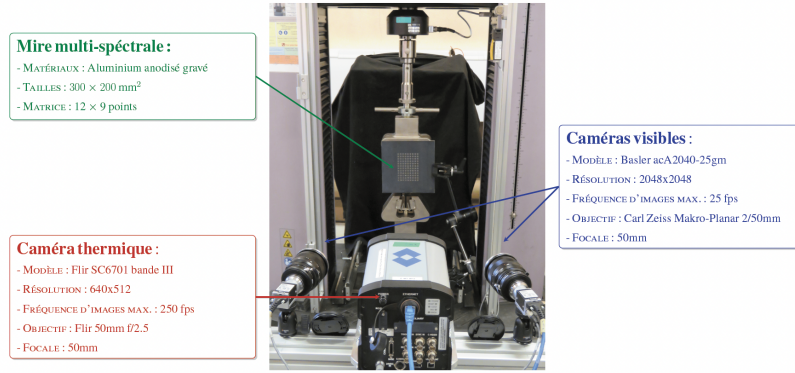


FIGURE 2 – Banc d'essai de traction uniaxiale équipé du système de mesure multi-physique CIN-EF/TIR.

3.2 Mise en donnée de l'étude EF

Afin d'établir une base de comparaison quantitative, une simulation par éléments finis de l'essai de traction a été implémentée. Le modèle 3D de l'éprouvette utilise une loi de comportement élasto-plastique de type Johnson-Cook (JC) sous sa forme la plus simple :

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E \varepsilon & \text{if } \varepsilon \leq \varepsilon_{\text{yield}} \\ A + B (\varepsilon - \varepsilon_{\text{yield}})^n & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

avec les valeurs de paramètres matériau listés en Tab. 1. Les conditions aux limites en déplacement ont été appliquées sur les bords inférieurs et supérieurs du modèle, respectivement Ω_{inf} et Ω_{sup} sur la Fig. 3 selon 6 degrés de libertés représentés par $\underline{\Psi}_{\text{inf}}$ et $\underline{\Psi}_{\text{sup}}$. Une initialisation de ces conditions aux limites a été imposées grâce aux mesures faites par SCIN.

E	ν	A	B	n
180 GPa	0.3	350 MPa	1000 MPa	0.65

TABLE 1 – Valeurs initiales des paramètres du modèle de comportement élastoplastique utilisé

Afin de rendre compte des effets thermiques, le modèle EF intègre une loi de dissipation thermique de l'énergie de déformation plastique :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \eta \underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}_{\text{pl}} \quad (8)$$

où ρ est la masse volumique, C_p la capacité thermique massique, T la température, k la conductivité thermique, $\underline{\underline{\sigma}}$ le tenseur des contraintes, $\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}_{\text{pl}}$ le tenseur des vitesses de déformation plastique, et $\eta \in [0, 1]$ le coefficient de Taylor-Quinney représentant la fraction d'énergie plastique dissipée en chaleur. Les valeurs initiales de ces différents paramètres sont exprimées Tab. 2. La température T_0 est imposée sur

C_p	k	η
500 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	15 W/m.K	0.9

TABLE 2 – Valeurs initiales des paramètres matériaux thermiques

l'entièreté du domaine d'étude Γ à $t = 0$. Pour $t \neq 0$, T_0 est uniquement imposée sur les surfaces Ω_{inf} et Ω_{sup} .

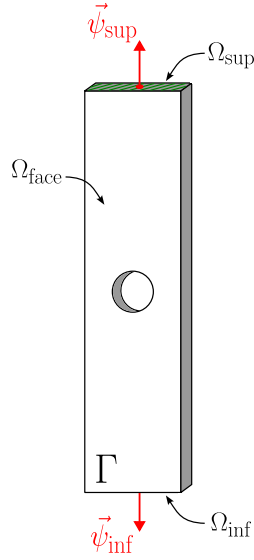


FIGURE 3 – Introduction des notations associées au modèle EF de l'éprouvette avec les conditions aux limites en déplacement $\underline{\psi}_{\text{inf}}$ et $\underline{\psi}_{\text{sup}}$ appliquées respectivement sur les surfaces Ω_{inf} et Ω_{sup} .

3.3 Identification des paramètres matériaux sur les données d'essai

3.3.1 Introduction du problème

Une identification d'un jeu de paramètres $\underline{\theta}$ a été réalisé par FEMU-W. L'identification se repose sur la minimisation de la fonctionnelle suivante :

$$J(\underline{\theta}, t) = \int_{\Omega_{\text{face}}} \|\underline{U}_{\text{mes}}(t) - \underline{U}_{\text{sim}}(\underline{\theta}, t)\|_{\mathcal{W}_{\text{DIC}}}^2 d\Omega_{\text{face}} + \gamma_{\Phi} \|\underline{R}_{\text{mes}}(t) - \underline{R}_{\text{sim}}(\underline{\theta}, t)\|_{\mathcal{W}_{\text{RF}}}^2 + \gamma_T \int_{\Omega_{\text{face}}} \|\underline{D}_{\text{mes}}(t) - \underline{D}_{\text{sim}}(\underline{\theta}, t)\|_{\mathcal{W}_{\text{TIR}}}^2 d\Omega_{\text{face}} \quad (9)$$

avec $\underline{U}_{\text{mes}}$ et $\underline{U}_{\text{sim}}$ représentant respectivement les champs de déplacement mesuré et simulé. La partie cinématique de la fonctionnelle est pondérée par \mathcal{W}_{DIC} , construit par rapport aux incertitudes de la SCIN [5]. $\underline{R}_{\text{mes}}$ et $\underline{R}_{\text{sim}}$ les forces de réaction sur le mors inférieur mesurée et simulée, $\mathcal{W}_{\text{RF}} = 1/\sigma_{\text{RF}}$ représente la pondération qui découle de l'incertitude associée à la cellule d'effort utilisée pour l'essai et γ_{Φ} le poids associé aux résidus des forces de réaction. $\underline{D}_{\text{mes}}$ et $\underline{D}_{\text{sim}}$ représente les niveaux numériques associés au champ de température mesuré et simulé, et γ_D le poids associé aux résidus en niveaux numériques thermiques et \mathcal{W}_{TIR} la pondération associée aux incertitudes du champ thermique mesuré par TIR. Les paramètres optimaux $\underline{\theta}^*$ sont obtenus en minimisant la fonctionnelle J , définie Eq. (9) tel que :

$$\underline{\theta}^* = \underset{\underline{\theta} \in \mathcal{P}}{\operatorname{argmin}} \sum_{t=0}^{n_T} J(\underline{\theta}, t) \quad (10)$$

où n_T définit le nombre de pas de temps et \mathcal{P} l'espace des paramètres optimisés.

3.3.2 Premiers résultats d'optimisation

Un recalage couplé cinématique/thermique a été réalisé sur les paramètres $\underline{\theta} = \{E, A, B, n, \eta\}$. Ces paramètres sont le fruit d'un choix purement arbitraire. On observe une variation significative des paramètres $\underline{\theta}$ après optimisation comme présenté Tab. 3.

E	A	B	n	η
124.5 GPa	336 MPa	1427 MPa	0.82	0.61

TABLE 3 – Valeurs des paramètres $\underline{\theta}$ après optimisation

4 Conclusion

Les travaux présentés dans ce résumé proposent un formalisme pour le couplage de la Corrélation d'Images Numériques Éléments Finis et de la Thermographie InfraRouge, basé sur un calibrage photogrammétrique bayésien. Ce couplage permet, entre autres, d'accéder à des informations multi-physiques enrichies, pour le suivi et l'analyse des essais mécaniques.

Cette approche nous a permis de réaliser le recalage de paramètres d'une loi de comportement thermo-élasto-plastique pour une éprouvette en acier inoxydable 304L en développant une méthode *Finite Element Method Updating Weighted*. Cette identification repose sur la minimisation d'une fonctionnelle de coût intégrant les écarts entre les champs de déplacement, les forces de réaction et les champs thermiques, mesurés et simulés.

Cette étude ouvre des perspectives prometteuses quant au potentiel des mesures de champs couplées pour l'identification de loi comportement. Celle-ci permet d'améliorer la prédictivité des modèles numériques, tout en réduisant les coûts et les délais associés aux campagnes de caractérisation des matériaux.

Références

- [1] N. CHOLEWA et al. "A Technique for Coupled Thermomechanical Response Measurement Using Infrared Thermography and Digital Image Correlation (TDIC)". In : *Experimental Mechanics* (août 2015).
- [2] Henri P GAVIN. "The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems". en. In : (2024).
- [3] Michel GREDIAC et Francois HILD. *Full-Field Measurements and Identification in Solid Mechanics*. en. Google-Books-ID : JUawSvgyvkC. John Wiley & Sons, déc. 2012. ISBN : 978-1-118-57847-6.
- [4] Berthold HORN et Brian SCHUNCK. "Determining Optical Flow". In : *Artificial Intelligence* 17 (août 1981), p. 185-203.
- [5] F. MATHIEU et al. "Estimation of Elastoplastic Parameters via Weighted FEMU and Integrated-DIC". en. In : *Experimental Mechanics* 55.1 (jan. 2015), p. 105-119. ISSN : 1741-2765.
- [6] Jorge J. MORÉ. "The Levenberg-Marquardt algorithm : Implementation and theory". en. In : *Numerical Analysis*. Sous la dir. de G. A. WATSON. Berlin, Heidelberg : Springer, 1978, p. 105-116. ISBN : 978-3-540-35972-2.
- [7] T. POTTIER et al. "Inelastic heat fraction estimation from two successive mechanical and thermal analyses and full-field measurements". In : *European Journal of Mechanics - A/Solids* 38 (mars 2013), p. 1-11. ISSN : 0997-7538.