



HAL
open science

Utilisation de champs de mesures thermomécaniques pour la caractérisation du comportement des matériaux

Andre Chrysochoos, Bertrand Wattrisse

► To cite this version:

Andre Chrysochoos, Bertrand Wattrisse. Utilisation de champs de mesures thermomécaniques pour la caractérisation du comportement des matériaux. 17e Congrès Français de Mécanique, Aug 2005, Troyes, France. pp.CD-Rom. hal-00572557

HAL Id: hal-00572557

<https://hal.science/hal-00572557>

Submitted on 26 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Utilisation de champs de mesures thermiques pour la caractérisation du comportement des matériaux

André Chrysochoos, Bertrand Wattrisse

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) UMR 5508 UMII-CNRS
CC048, Université Montpellier II, Place E. Bataillon
34095 Montpellier Cedex 05, France

Résumé :

La thermographie infrarouge est une technique d'imagerie utile à l'analyse du comportement thermomécanique des matériaux. Elle permet, sous certaines conditions, d'enregistrer des champs de température de surface et, via un modèle de diffusion, d'estimer des sources de chaleur indiquant le caractère dissipatif et/ou thermiquement couplé des mécanismes de déformation. Cependant, la diffusion de la chaleur au sein de la matière et les échanges avec le milieu extérieur rendent délicat le passage des températures aux sources. L'objectif de ce texte est d'illustrer, au travers d'exemples simples, l'effet régularisant de la diffusion et la nature instable de la reconstruction des sources à partir des données thermiques. Ce texte veut aussi rappeler que la prise en compte des phénomènes de diffusion devient particulièrement importante dès que le matériau est le siège de couplages thermomécaniques forts. Pour illustrer ceci, on a considéré l'exemple d'une éprouvette monocristalline d'AMF pseudoélastique dont la cinétique de changement de phase sous contrainte est modifiée par les variations de température induites par la chaleur latente et les échanges avec le milieu extérieur.

Abstract:

Infrared thermography is a useful imaging technique for analyzing the thermomechanical behaviour of materials. It allows, under certain conditions, surface temperature monitoring and, via a diffusion model, estimation of heat sources induced by dissipative and/or thermally coupled deformation mechanisms. However, heat diffusion within the matter and heat exchanges with the surroundings complicate the passage from temperature to heat source. The objective of this text is simply to illustrate, through simple examples, the regularizing effects of diffusion and the instability of heat source derivation from thermal data. This text also stresses that it is particularly important to understand diffusion phenomena when strong thermomechanical couplings are involved. As an illustrative example, we considered a single-crystal specimen of pseudoelastic SMA where the kinetics of the stress-induced phase transition was modified by temperature variations due to latent heat and heat exchanges with the surroundings.

Mots clefs :

Thermographie – diffusion – thermomécanique – dissipation – couplage

1 Introduction

Les dégagements de chaleur qui accompagnent la déformation des matériaux solides sont de différentes natures. On peut distinguer les sources liées à une dissipation d'énergie et celles provenant de couplages thermomécaniques. La dissipation traduit le caractère irréversible du processus de déformation alors qu'une source de couplage signale, par exemple, que l'état de contrainte est dépendant de la température.

Il convient de noter que les variations de température induites dépendent de l'intensité et de la distribution des sources au sein du matériau mais aussi de sa diffusivité et des conditions d'échange avec le milieu extérieur. Ces variations de température ne sont donc pas totalement intrinsèques au comportement des matériaux. Il est donc intéressant de développer des méthodes de traitement d'images qui permettent d'évaluer les puissances calorifiques mises en jeu par la déformation à partir des champs de températures de surface fournis par une caméra infrarouge. Le point le plus délicat du traitement des données thermiques est l'estimation des fuites chaleur par diffusion.

Le présent article décrit brièvement les principales étapes du protocole menant à l'estimation des champs de source. Il se termine par le rappel de quelques résultats illustrant l'intérêt d'une analyse du comportement des matériaux où l'on tient compte du caractère anisotherme des processus de déformation.

2 Métrologie infrarouge

L'obtention de champs de mesures thermiques quantitativement correctes n'est pas simple et l'avènement des caméras matricielles, certes plus rapides et plus sensibles que les caméras équipées d'un monodétecteur et d'un système de balayage, n'a pas simplifié la situation. La raison principale vient du fait qu'actuellement, la réponse d'une matrice de détecteurs face à une scène thermique uniforme n'est pas uniforme. Nous ne détaillerons pas ici les problèmes de métrologie infrarouge et nous renvoyons le lecteur intéressé par ces aspects aux travaux récents de [1]. Il nous semble toutefois important de rappeler qu'une caméra infrarouge n'est pas immédiatement un instrument de mesure et que toute utilisation quantitative des images thermiques réclame certaines précautions. Suivant les applications envisagées et les matériels utilisés, il conviendra en effet :

- de vérifier la stabilité thermique du système thermographique,
- d'effectuer un étalonnage de la chaîne complète de mesure, caméra et optique étant stables,
- de connaître l'émissivité du matériau étudié,
- de déterminer la résolution spatiale de la caméra dans les conditions optiques d'utilisation,
- de contrôler les fréquences d'acquisition et le nombre d'images enregistrées.

3 Equation de diffusion et propriétés thermophysiques

L'équation de diffusion permet de relier les champs thermiques aux quantités de chaleur mises en jeu. En notant ρ la masse volumique, C_α la chaleur spécifique, T la température absolue, k le tenseur de conduction, d_1 la dissipation, s_{thm} les sources de couplage et r_e le terme volumique d'échange de chaleur avec le milieu extérieur, l'équation de diffusion s'écrit :

$$\rho C_\alpha \dot{T} - \text{div}(k \cdot \text{grad}T) = d_1 + s_{\text{thm}} + r_e \quad (1)$$

Au premier membre, l'opérateur aux dérivées partielles appliqué à la température fait intervenir plusieurs paramètres caractérisant localement le matériau. La qualité du passage des températures aux sources dépend donc en premier lieu de la précision avec laquelle ces paramètres sont connus. Pour des matériaux non homogènes et anisotropes, la détermination des sources sera donc subordonnée à la connaissance de ces champs de paramètres dont un est de nature tensorielle... Par ailleurs, la chaleur spécifique à identifier est définie pour des processus d'échauffement à α constants (α représentant l'ensemble des variables d'état privé de la température). On rappelle ici que le classique C_p de nos *Handbooks of Chemistry and Physics* implique que la pression et température sont les seules variables d'état utilisées pour décrire le comportement thermomécanique du matériau. C'est pourquoi, dans le cadre de nos essais, nous avons été amenés jusqu'à présent à adopter les hypothèses suivantes :

- la conduction de la chaleur est isotrope. Si, par ailleurs r_e est indépendant du temps et que l'on note T_0 le champ de température à l'équilibre du système, nous aurons alors $-k\Delta T_0 = r_e$,
- la masse volumique, la chaleur spécifique et le coefficient de conduction sont des constantes caractéristiques du matériau, indépendantes son état thermodynamique,
- pour des essais quasi-statiques et/ou tant que les gradients de température restent faibles, on néglige les termes convectifs dans la dérivation particulière. Cependant si l'on combine techniques de granularité et thermographie infrarouge, on peut alors tenir compte du transport de matière et suivre durant l'essai la température moyenne de toute surface matérielle. En transformations finies, ceci nous a permis de construire des bilans locaux d'énergie dans et hors des zones de striction [2]. Pour certains matériaux peu conducteurs et ductiles (polymères), la puissance calorifique convectée dans les lèvres mobiles de striction s'est avérée représenter une part importante de la source dissipative, et ce, même dans des conditions de chargement quasi statique [3].

En tenant compte des hypothèses simplificatrices précitées, l'équation de la chaleur peut être réécrite de la façon compacte suivante :

$$\rho C_\alpha \partial\theta/\partial t - k\Delta\theta = d_1 + s_{\text{thm}} = s \quad (2)$$

où $\Delta\theta = \Delta(T - T_0)$ symbolise le laplacien de la variation de température par rapport à l'équilibre et où s représente la somme des sources de chaleur. Ces hypothèses sont raisonnables dans un grand nombre de cas mais peuvent devenir plus discutables dès qu'une forte anisotropie préexiste ou apparaît au cours de la déformation, lorsque le matériau est le siège de transformation de phase du second ordre, ou quand le chargement thermomécanique fait apparaître des instabilités thermiques ou mécaniques.

4 Modèles thermiques

Même dans sa forme simplifiée, l'équation de la chaleur (Eq.(2)) ne peut être utilisée directement pour l'estimation des fuites et des sources de chaleur. En effet, les caméras ne donnent que des informations en surface ce qui est insuffisant pour estimer une distribution 3D de sources. De nouvelles concessions doivent donc être faites.

Pour des essais uniaxiaux réalisés sur des éprouvettes planes de faible épaisseur, une première possibilité est de travailler avec une équation de diffusion intégrée dans l'épaisseur [4]. En notant $\theta(t, x, y)$, le champ des variations de température moyenne, l'équation de diffusion 2D s'écrit :

$$\rho C \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\theta}{\tau_{th}^{2D}} \right) - k \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) = s(t, x, y), \quad (3)$$

où $s(t, x, y)$ est la distribution surfacique des sources moyenne dans l'épaisseur à l'instant t et où τ_{th}^{2D} est une constante de temps caractéristique des fuites par les faces avant et arrière de l'éprouvette [4]. Si l'on divise l'équation (3) par ρC , on fait apparaître le coefficient de diffusion $k/\rho C$ et la source au second membre a alors pour unité le $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Cette opération permet de définir pour chaque type de source *une vitesse équivalente d'échauffement ou de refroidissement* correspondant à un processus en condition adiabatique. Elle facilite la comparaison de sources de natures différentes ou de même nature mais d'un matériau à l'autre.

L'utilisation pratique de l'équation (3) impose que la température mesurée en surface reste proche de la température moyenne dans l'épaisseur e . Cette hypothèse est d'autant mieux vérifiée que les sources sont régulièrement réparties suivant l'épaisseur et que le temps caractéristique de diffusion dans l'épaisseur $\tau_{dif} = \rho C_{\alpha} e^2 / k$ est faible, les fuites de chaleur par les faces avant et arrière étant considérées comme linéaires.

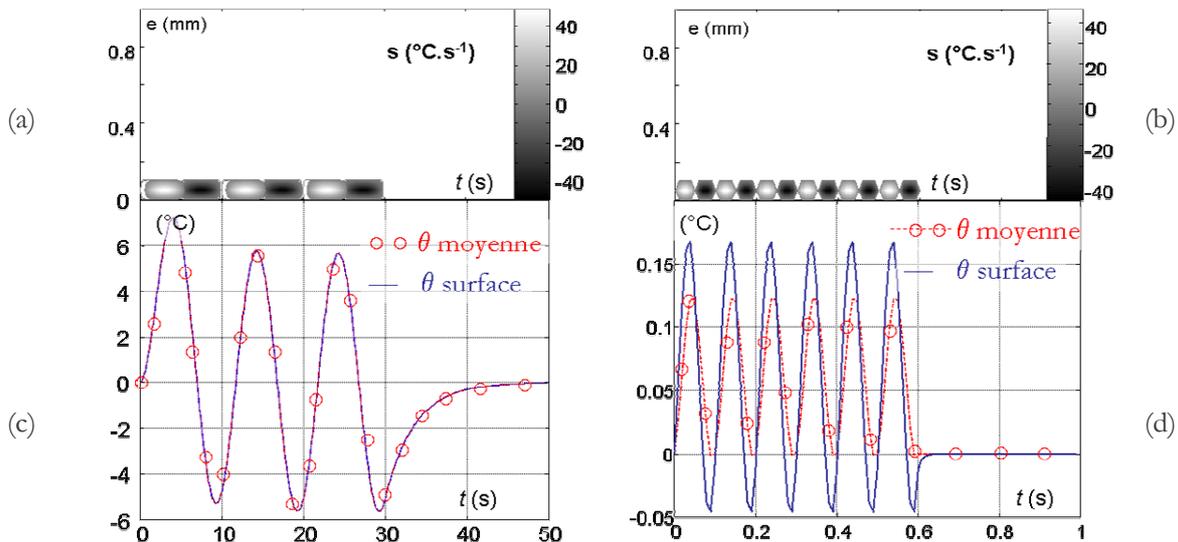


FIG. 1 – Effet de diffusion suivant l'épaisseur. (a-b) distribution des sources suivant l'épaisseur en fonction du temps ; (c-d) comparaison des températures moyennes et de surface. $\rho = 7800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; $C_{\alpha} = 450 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$; $k = 60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, $e = 1 \text{ mm}$; $\tau_{dif} \approx 0,07 \text{ s}$; (a-c) $f_s = 0.1 \text{ Hz}$; (b-c) $f_s = 10 \text{ Hz}$.

L'exemple de la figure 1 montre un cas extrême où les sources se concentrent à la proximité d'une des deux surfaces, l'évolution dans le temps étant décrite par un sinus battant à la fréquence f_s .

Deux cas ont été simulés :

- Figure 1_ac, on a pris $f_s \ll \tau_{\text{dif}}^{-1}$; la température moyenne dans l'épaisseur et celle de surface sont indiscernables, la chaleur ayant le temps de diffuser dans l'épaisseur.

- Figure 1_bd, on a pris $f_s \approx \tau_{\text{dif}}^{-1}$; les variations de température moyenne sont plus faibles que celles observées sur la surface (où sont les sources), la chaleur n'ayant pas le temps de diffuser.

Dans le même esprit, d'autres modèles de diffusion thermique peuvent être proposés [4]. Par exemple, dans le cas simple mais important en pratique où matériau et essai sont supposés homogènes, les sources sont alors réparties uniformément dans la partie utile de l'éprouvette. Si les conditions aux limites sont symétriques (pour des faces opposées de l'éprouvette) et linéaires (de type Fourier) et si initialement le champ de température est uniforme, on peut alors montrer que l'équation de la chaleur se réduit à une simple équation différentielle et l'intensité des sources peut alors être déterminée à partir de l'évolution de la variation de température au centre de l'échantillon [5].

5 Traitement du signal

Comme le suggère l'exemple de la Figure 1, l'effet régularisant de la diffusion est donc bénéfique lorsqu'il s'agit d'estimer des sources à partir de mesures thermiques en surface. Pour illustrer qualitativement cet effet, nous avons considéré un modèle de diffusion 1D stationnaire dans une direction Ox , τ_{th}^{1D} représentant la constante de temps de fuite dans le plan perpendiculaire à cette direction (Figure 2). Bien que les sources soient distribuées aléatoirement, on constate que le profil des températures reste, comparativement, très régulier.

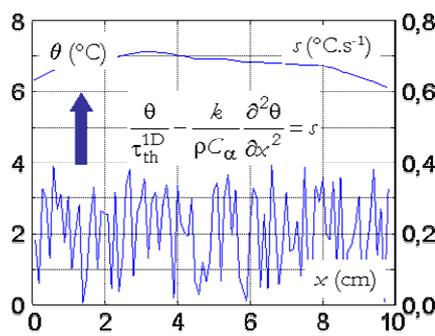


FIG. 2 – Effet régularisant de la diffusion dans le cas d'un modèle 1D stationnaire.

Les constantes du modèle sont $\rho = 7800 \text{ kg.m}^{-3}$, $C_\alpha = 450 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, $k = 60 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, $L = 0,1 \text{ m}$, $\tau_{\text{th}}^{1D} = 50 \text{ s}$. La courbure globale du profil des températures est ici imposée par les conditions aux limites de la forme $\partial\theta/\partial n + \lambda\theta = 0$, caractérisant des fuites linéaires et où n est la normale extérieure au domaine ($\lambda = 10 \text{ m}^{-1}$).

On conçoit alors que le chemin inverse menant des températures aux sources soit alors particulièrement instable dès que l'information thermique est bruitée. Pour illustrer cela, on a utilisé le modèle précédent dans le cas simple où le profil des températures se réduit à $\theta_a(x) = \theta_0 \cos \omega_0 x$, ω_0 étant la 1^{ère} pulsation propre associée à la base des fonctions propres en cosinus de l'opérateur $-\partial^2/\partial x^2$ pour les conditions aux limites choisies ($\omega_0 \cdot \text{tg}(\omega_0 \cdot L/2) = \lambda$, $\omega_0 \in]0, \pi/L[$).

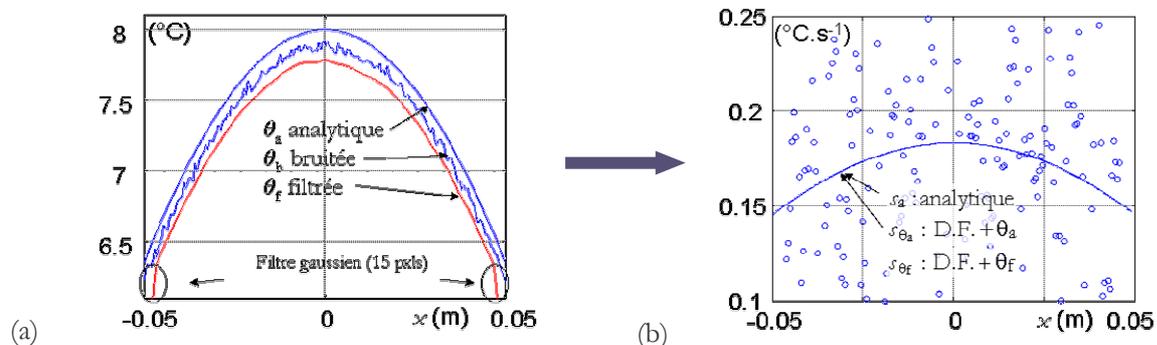


FIG. 3 – Estimation des sources (b) à partir de données thermiques (a).
Les constantes du modèle sont celles de la Figure 2, avec $\theta_0 = 8 \text{ °C}$ et $\omega_0 \approx 13.0 \text{ m}^{-1}$.

Figure 3_a, les profils thermiques analytique, bruité et filtré ont été translatés de 0,1 °C de façon à pouvoir les comparer plus facilement. Nous avons choisi un bruit blanc conforme aux observations expérimentales [4], d'environ 0,1 °C d'amplitude crête à crête. Le signal a été ensuite filtré (filtrage convolutif gaussien). Figure 3_b, ont été tracés : le profil des sources déterminées analytiquement et celui déduit des températures non bruitées en utilisant une approximation par différences finies de l'opérateur de diffusion. Les deux courbes sont quasiment indiscernables avec les échelles choisies. Le nuage de points correspond à l'estimation des sources par différences finies avec les températures filtrées. Nous n'avons pas représenté les sources déterminées à partir des données thermiques bruitées, le bruit sur les sources étant bien trop important ($16 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$). Même après filtrage (passe-bas) des températures, la méthode des différences finies n'est ici pas adaptée au calcul de sources : l'approximation du laplacien amplifiant trop fortement les effets du bruit (blanc : spectre de puissance uniforme).

Pour estimer les sources suivant le modèle thermique choisi, plusieurs méthodes de traitement ont été utilisées. Par le passé, nous avons employé les techniques de Fourier [4], une méthode fondée sur une approximation des solutions analytiques spectrales de l'équation de la chaleur [5], des méthodes de lissage local dans l'espace et dans le temps sur un ensemble de fonctions adapté au chargement mécanique [2, 6]. Un traitement d'images utilisant des ondelettes à support compact [7] et une méthode inverse de type «contrôle optimal» [8] ont aussi été envisagés et mériteraient d'être étudiés plus en détails dans des cas pratiques.

6 Diffusion et couplage

La mesure des champs de température et la détermination des flux de diffusion sont nécessaires à l'estimation des sources de chaleur. Cette information expérimentale permet aussi de mieux comprendre certains mécanismes de déformation et ce tout particulièrement lorsque le matériau étudié est le siège de forts couplages thermomécaniques. C'est le cas des alliages à mémoire de forme (AMF) lorsque leur comportement est qualifié de pseudoélastique. Dans certaines conditions thermomécaniques (diagramme de phase), le matériau change de phase sous contrainte (changement de réseau cristallographique) et se déforme. La transformation est accompagnée d'une chaleur latente (correspondant à une source de couplage) qui fait varier la température de la matière. Les variations de températures modifient alors la cinétique de changement de phase et, par voie de conséquence, le champ de déformation [9,10]. Les résultats ci-dessous sont issus de [11,12] et montrent l'influence des effets de diffusion sur la transformation de phase dans une éprouvette monocristalline.

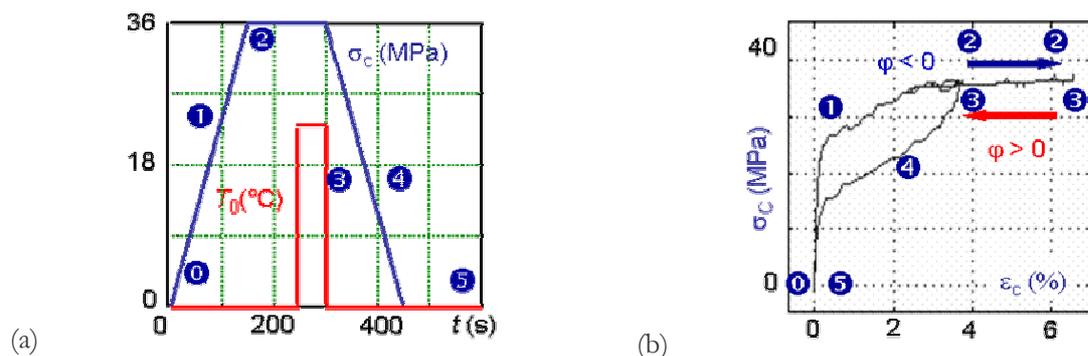


FIG. 4 – Epreuve monocristalline de CuZnAl. (a) chargement thermomécanique ; (b) réponse mécanique conventionnelle ($\sigma_c = F/S_0$, $\epsilon_c = \Delta L/L_0$) [11]. On peut observer une boucle d'hystérésis, ici essentiellement due à l'action conjointe d'une dissipation thermique (diffusion) et d'un mécanisme de couplage fort, en d'autres termes, d'un changement de phase anisotherme sous contrainte.

Le chargement mécanique et thermique est représenté schématiquement à la Figure 4_a : l'étape 1 est un chargement à contrainte imposée et à température ambiante constante ; étape 2, on maintient la contrainte à son niveau maximal avec un échauffement brusque de l'air ambiant à partir de 3 ; étape 4, après un retour rapide à la température ambiante initiale, on effectue une décharge complète à vitesse de contrainte imposée jusqu'en 5.

La courbe contrainte-déformation, associée à ce chargement, est représentée Figure 4_b. Le début de la courbe correspond à un comportement élastique puis une fois le domaine de transition atteint, la courbe s'incurve (transformation austénite-martensite exothermique) ❶. Une fois le palier atteint en ❷, l'éprouvette flue. L'expérience montre que l'intensité et le sens de fluage sont directement reliés à l'intensité et au sens du flux de chaleur à la frontière [11]. En ❸ par exemple, l'élévation de la température de l'air ambiant inverse le sens du flux de chaleur ainsi que le sens de la vitesse de fluage associé alors à une transformation martensite-austénite endothermique. En ❹, la transformation inverse se poursuit durant la décharge des efforts. Lorsque celle-ci est terminée on retrouve le comportement élastique de départ, puis à partir de ❺, la contrainte et la déformation retrouvent leur valeur initiale.

7 Commentaires

L'exemple précédent a été choisi pour illustrer l'intérêt d'une analyse expérimentale du comportement des matériaux solides qui soit à la fois mécanique, thermique et énergétique. Dans le cas particulier des transformations de phase solide-solide, l'analyse des données infrarouges nous a conduits en définitive à considérer le changement de phase comme un mécanisme de couplage thermomécanique, stable au sens de Gibbs [13], pas ou faiblement dissipatif [10,12]. Les modèles développés ont ensuite permis de vérifier que le caractère endo-exothermique de la transformation (chaleur latente) associé à une forte sensibilité du comportement mécanique à la température permettaient de retrouver certains effets mécaniques observés durant les essais : existence et entrelacement des boucles d'hystérésis, adoucissement cyclique, mécanismes de fluage et de relaxation, propagation de front de changement de phase pour les monocristaux. D'autres exemples auraient pu, bien sûr, être cités tant les domaines où la thermographie infrarouge peut intervenir représentent en fait un champ d'investigation considérable. Le comportement thermomécanique des matériaux sous chargement mécanique et thermique est encore souvent analysé, faute d'information, en identifiant la température du matériau à celle de consigne. Quand son rôle n'est pas réduit à celui de paramètre, la température est souvent qualifiée de *variable de commande*, court-circuitant ainsi toute prise en compte des effets de diffusion. Nous sommes persuadés que ces approximations masquent des phénomènes importants qui pourront être mis en évidence en mesurant, plus systématiquement et avec toutes les précautions qui s'imposent, les champs de température accompagnant les processus de déformation.

References

- [1] H. Pron, C. Bissieux, *Focal plane array infrared cameras as research tools*, Journal of QIRT, 2004, Vol. 1, n°2, pp.1-14.
- [2] A. Chrysochoos, J.-M. Muracciole, B. Wattrisse, *Experimental analysis of strain and damage localization*, Continuous damage and fracture, 2000, Ed. A. Benallal, pp.41-51.
- [3] B. Wattrisse, J.-M. Muracciole, A. Chrysochoos, *Thermomechanical effects accompanying the localized necking of semi-crystalline polymers*, Int. J. of Therm. Sci., 2001, 41, pp.422-427,
- [4] A. Chrysochoos, H. Louche, *An infrared image processing to analyze the calorific effects accompanying strain localisation*, Int. J. of Eng. Sci., 2000, 38, p.1759-1788,
- [5] A. Chrysochoos, *Analyse du comportement thermomécanique des matériaux par thermographie infrarouge*, Photomécanique 95, Eds. Y. Berthaud *et al.*, Eyrolles, 1995, p.203-211,
- [6] T. Boulanger, A. Chrysochoos, C. Mabru, A. Galtier, *Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels*, Int. J. of Fatigue, 2004, 26, pp. 221-229.
- [7] T. T.-W. Nguyen, *De la température aux sources de chaleur ; quelques méthodes numériques en imagerie mécanique*, Thèse de doctorat Université Montpellier II, 2001.
- [8] B. Mohammadi, J.-H. Saïac, *Pratique de la simulation numérique, Industrie et technologies*, série Conception, Dunod, 2003, Chap.13, pp.325-333.
- [9] A. Chrysochoos, H. Pham, O. Maisonneuve, *Energy balance of thermoelastic martensite transformation under stress*, Nuclear Engineering and Design, 1996, vol. 162, p.1-12.
- [10] R. Peyroux, A. Chrysochoos, C. Licht, M. Löbel, *Thermomechanical couplings and pseudoelasticity of shape memory alloys*, Int. J. Engng Sci., 1998, vol. 36, n°4, pp.489-509.
- [11] X. Balandraud, A. Chrysochoos, S. Leclercq, R. Peyroux, *Effet du couplage thermomécanique sur la propagation d'un front de changement de phase*, C.R. Acad. Sci., 2001, t.329, Série IIb, pp. 621-626.
- [12] A. Chrysochoos, C. Licht, R. Peyroux, *Une modélisation thermomécanique unidimensionnelle de la propagation d'un front de changement de phase dans un monocristal d'AMF*, C. R. Acad. Sci., 2003, 331, pp. 25-32.
- [13] H. B. Callen, *Thermodynamics and an introduction to Thermostatistics*, 1985, Wiley & Sons, pp. 203-253.