

Proposition d'une approche découplée pour l'identification des sources de chaleurs cycliques à partir de champs de température en présence de grandes déformations

T. Glanowski^{a,b}, V. Le Saux^b, C. Doudard^b, Y. Marco^b, C. Champy^a, P. Charrier^a

a. Vibracoustic, CAE & DurabilityPrediction, thomas.glanowski@vibracoustic.com

b. ENSTA Bretagne, Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDL), FRE CNRS 3744,

Résumé

Une méthodologie est proposée pour définir une géométrie équivalente permettant l'utilisation d'un algorithme découplé pour résoudre un problème thermomécanique en présence de grandes déformations cycliques. Cette méthodologie est tout d'abord définie sur le cas simple d'un barreau cylindrique et ensuite appliquée sur une éprouvette de structure. L'existence de cette géométrie équivalente est mise en évidence et sa dépendance aux conditions aux limites thermiques (habituellement inconnues du problème thermomécanique) est illustrée. L'approche proposée est finalement appliquée à l'identification de la dissipation cyclique à partir de champs de température.

Mots clés : Equation de la chaleur ; Identification de sources de chaleur cycliques ; Thermographie infrarouge.

1. Introduction

De nombreux matériaux présentent sous chargement cyclique un phénomène appelé auto-échauffement. Ce phénomène se traduit par une évolution de la température du matériau. Celle-ci est liée à la compétition entre les sources internes de chaleur et les pertes par conduction à l'intérieur du matériau et avec le milieu extérieur par les conditions limites thermiques [1-2]. L'analyse de ce phénomène fournit, notamment, des informations précieuses sur les propriétés en fatigue [3-4]. La température n'étant pas une propriété intrinsèque, il est courant de chercher à remonter aux sources internes de chaleur.

Afin d'estimer la température d'auto-échauffement, il est nécessaire de résoudre un problème thermomécanique couplé. Cette stratégie de résolution permet de prendre en compte tous les couplages faibles tels que la variation des conditions limites thermiques due au changement de géométrie durant la sollicitation mécanique, la conversion d'énergie mécanique en chaleur et la thermoélasticité. Cependant, elle nécessite des temps de calcul très importants car elle ne tire pas parti des différences potentiellement significatives entre les temps caractéristiques mécanique et thermique. Une approche découplée peut en conséquence apparaître plus appropriée pour résoudre ce problème.

Cette méthode consiste à résoudre tout d'abord le problème mécanique jusqu'à atteinte de l'équilibre mécanique (généralement après un nombre de cycles limité), puis à alimenter le problème thermique (résolu sur un grand nombre de cycles) à partir des résultats de cette simulation. Cependant, cette simulation thermique doit être réalisée sur une géométrie fixe. Dans le cas des grandes déformations, la solution dépend de la géométrie choisie [5]. Le Chenadec *et al.* [5] ont montré que cette stratégie reste applicable en définissant une approximation cyclique du problème thermique. Néanmoins, l'équation obtenue n'est pas classique et ne peut pas être résolue avec les outils usuels de simulation. De plus, l'équation proposée par Le Chenadec *et al.* repose sur une hypothèse forte (faible conductivité thermique) qui limite la validité de cette approche au cas général. Dans cette étude, nous suggérons une méthodologie alternative basée sur une question très simple : est-il possible de définir une géométrie

« moyenne » telle que la solution thermique obtenue pour un algorithme de résolution découplé soit la même que celle obtenue pour un algorithme couplé ?

Cet article est composé de trois sections. Dans un premier temps, la démarche proposée est appliquée au cas simple d'un barreau cylindrique avant d'être étendue à une éprouvette de structure. La démarche est ensuite appliquée à l'identification du champ de sources cycliques. Enfin, une conclusion dresse un bilan de l'étude.

L'ensemble des résultats présentés ici sont disponibles dans [6].

2. Recherche de la géométrie équivalente dans le cas 1D

Dans cette partie, la méthodologie pour identifier une géométrie équivalente est présentée. Elle repose sur la résolution de l'équation de la chaleur.

2.1 Equation de la chaleur

Nous considérons ici la formulation 1D de l'équation de la chaleur [7] (équation 1) :

$$\bullet \quad \theta(x,t) + \frac{\theta(x,t)}{\tau_{eq}(x,t)} - \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} \frac{\partial S(x,t)}{\partial x} \frac{1}{S(x,t)} = \frac{1}{\rho c_p} S_t(x,t) \quad \text{avec} \quad \tau_{eq} = \frac{\rho c_p S(x,t)}{h_l P(x,t)}$$

Équation 1 : Equation de la chaleur 1D considérée.

Cette équation fait apparaître deux paramètres géométriques ($S(x,t)$ et $P(x,t)$ respectivement la surface et le périmètre) qui illustrent le couplage entre la géométrie (issue du calcul mécanique) et la température.

2.2 Définition de la géométrie équivalente

La géométrie équivalente peut être définie comme étant la géométrie fixe menant à la même variation de la température moyenne que lors d'un calcul couplé, c'est-à-dire avec une géométrie variable. Afin de déterminer cette géométrie équivalente, nous définissons le paramètre a tel que :

$$d_{eq} = d_{min} + a(d_{max} - d_{min}) \quad \text{avec} \quad 0 \leq a \leq 1$$

Équation 2 : Définition de la géométrie équivalente.

Avec d_{eq} le déplacement équivalent menant à la géométrie équivalente et d_{min} , respectivement d_{max} , le minimum, respectivement le maximum de déplacement du chargement cyclique. La stratégie permettant d'obtenir la géométrie équivalente repose sur la minimisation de la différence de température entre la solution couplée et la solution obtenue pour une géométrie fixe.

2.3 Cas du barreau à section constante

La géométrie du barreau et les conditions aux limites mécanique et thermique sont illustrées sur la Figure 1. Le terme source est choisi constant : $S_t = 0.01 \text{ mW.mm}^{-3}$. Le barreau est soumis à un déplacement cyclique : $d(t) = d_{moy} + d_{amp} \sin(2\pi f t)$. Le coefficient de convection entre la surface extérieure et l'air est choisi nul ($h_f = 0$) afin de se ramener au cas 1D de l'équation de la chaleur (pas de gradient thermique cœur / peau). Les conditions aux limites mécaniques mènent à une déformation homogène de la barre avec une déformation nominale maximum égale à 50%.

La Figure 2 montre la comparaison entre la solution couplée et les solutions découplées pour quatre géométries différentes. Ces géométries correspondent au barreau non déformé ($a=0$), à l'extension moyenne ($a=0.5$), à l'extension maximale ($a=1$) et la géométrie optimale ($a_{opt}=0.425$) menant à une

évolution temporelle de la température identique à celle obtenue pour un calcul couplé. Ce résultat montre sur un cas simple qu'il existe bien une géométrie équivalente et qu'elle n'est pas triviale puisqu'elle ne correspond pas à la géométrie moyenne ($a=0.5$).

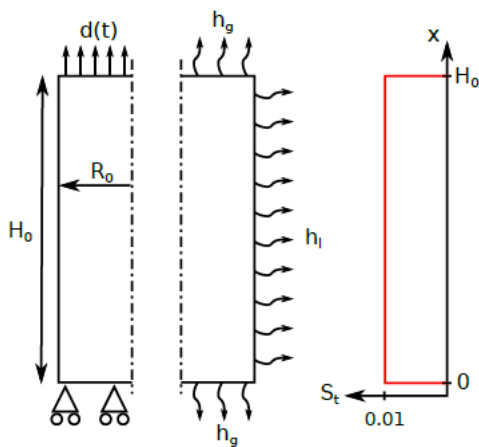


Figure 1 : Conditions aux limites mécanique et thermique pour le barreau.

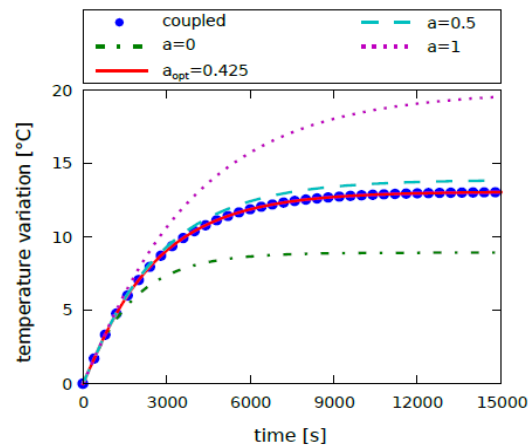


Figure 2 : Comparaison entre la solution couplée et des solutions découplées pour différentes géométries.

2.4 Cas d'une éprouvette de structure à section variable

La géométrie de l'éprouvette en caoutchouc et les conditions aux limites mécaniques et thermiques sont illustrées sur la Figure 3. Nous considérons la convection avec l'extérieur $h_l=0$.

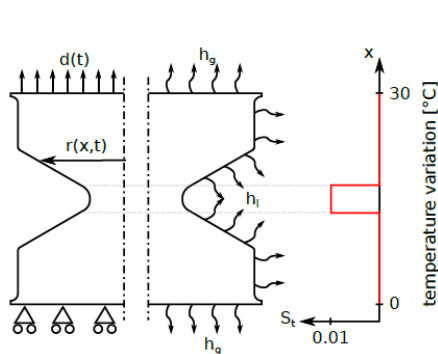


Figure 3 : Conditions aux limites mécaniques et thermiques pour l'éprouvette de structure.

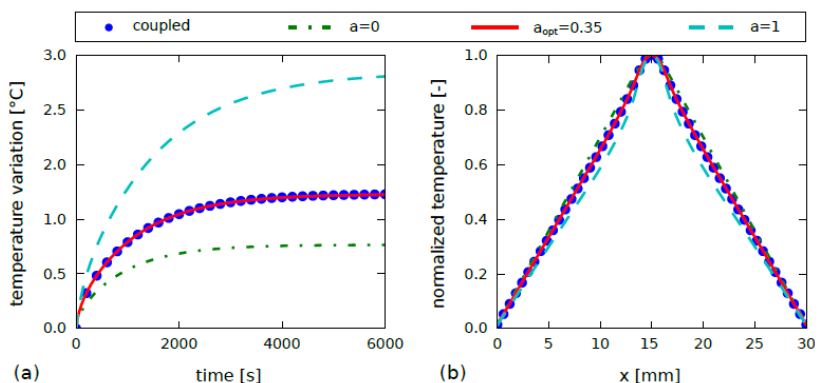


Figure 4 : Comparaison entre la solution couplée et des solutions découplées pour différentes géométries (a) variation temporelle de la température au centre de l'éprouvette, (b) variation de la température sur le profil stabilisé normalisé.

La résolution de ce problème est illustrée sur la Figure 4. La Figure 4a montre l'évolution temporelle de la température au centre de l'éprouvette. La superposition optimale est obtenue pour $a_{opt}=0.35$ et non plus 0.425 comme sur le barreau, démontrant ainsi que ce facteur est influencé par la géométrie de la structure considérée. La Figure 4b présente différents profils (coupe suivant la hauteur de l'éprouvette) de la température de surface normalisée, une fois l'équilibre thermique atteint. La très bonne concordance entre les solutions optimale découplée et couplée est un gage de l'applicabilité de notre approche pour des géométries plus complexes.

Une étude de sensibilité des différents paramètres a été menée. Celle-ci a montré que la distribution des sources de chaleur n'avait pas d'effet sur la géométrie équivalente. De plus, la convection avec l'air ambiant influence significativement cette dernière. Pour finir, il a été noté une diminution de a avec une augmentation du déplacement macroscopique (cf. Figure 5).

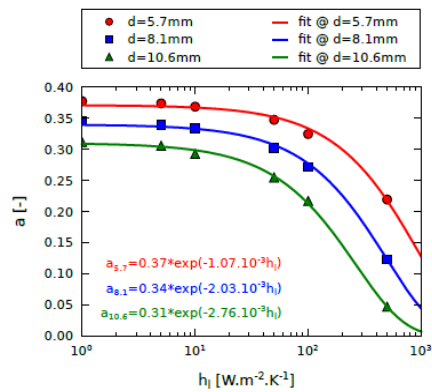


Figure 5 : Effets du coefficient de convection h_l sur la géométrie équivalente pour trois déplacements macroscopiques différents.

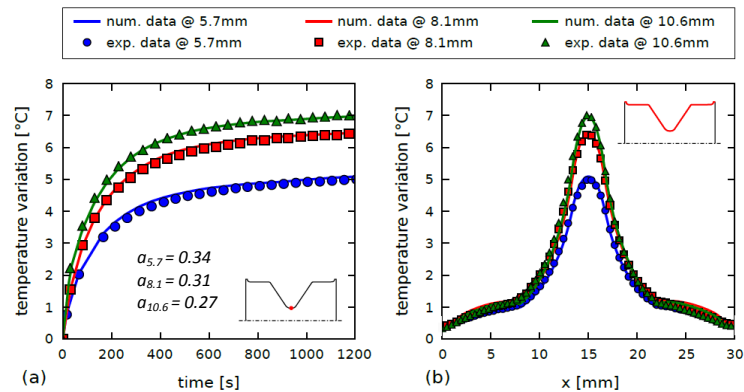


Figure 6 : Comparaison entre les données expérimentales et prédites avec les paramètres identifiés (a) évolution de la température au cours du temps, (b) variation de la température sur le profil stabilisé.

3. Identification d'un modèle de dissipation cyclique

Nous appliquons à présent la méthodologie définie précédemment afin d'identifier un modèle de dissipation cyclique. L'éprouvette diablo axisymétrique est utilisée. Disposant maintenant de résultats réels dont la distribution des sources de chaleur dans le volume nous est inconnue, et ne mesurant que la variation de température surfacique, nous utiliserons en conséquence le cas 3-D de l'équation de la chaleur. Nous considérons trois chargements macroscopiques à rapport de charge nul ($d_{max} = [5.7mm, 8.1mm, 10.6mm]$). Le modèle de dissipation de Le Chenadec [5] est identifié ($\kappa=0.1275$ et $\gamma=0.5181$) ainsi que les conditions aux limites thermiques ($h_{l\ 5.7}=66\ W.m^{-2}.K^{-1}$, $h_{l\ 8.1}=53\ W.m^{-2}.K^{-1}$, $h_{l\ 10.6}=43\ W.m^{-2}.K^{-1}$). Les coefficients de convections obtenus sont proches de ceux suggérés par Behnke et al. [8] sur des éprouvettes similaires. Une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et numériques est trouvée, que ce soit durant la phase transitoire, ou pour l'état stabilisé (cf. Figure 6).

4. Conclusion

Du fait de leur faible coût numérique, les algorithmes découplés sont intéressants pour résoudre les problèmes d'auto-échauffement qui apparaissent sous chargements cycliques. Cependant, pour une telle approche, le calcul thermique est réalisé sur une géométrie fixe. Lors de grandes déformations, le choix de cette géométrie a un impact fort sur la solution de l'équation de la chaleur. Une méthodologie est proposée pour définir une géométrie équivalente fournissant des résultats thermiques très similaires à ceux d'une solution couplée. Il a été montré que la géométrie équivalente dépend des conditions aux limites thermiques. L'approche précédente a été utilisée lors de l'identification d'un modèle cyclique de dissipation, proposée sur une éprouvette de structure de caoutchouc et a permis d'obtenir de très bonnes corrélations avec les résultats expérimentaux.

Références

- [1] J. Bergstrom, M. Boyce, J.M.P.S. 46, 931 (1998)
- [2] J. Lemaitre, J. Chaboche, Mechanics of Solid Materials (Cambridge University Press, 1990)
- [3] L. Jegou, Y. Marco, V. Le Saux, S. Calloch, I.J.F. 47, 259 (2012)
- [4] R. Munier, C. Doudard, S. Calloch, I.J.F. 63, 46 (2014)
- [5] Y. Le Chenadec, I. Raoult, C. Stolz, M. Nguyen-Tajan, J.M.M.S. 4, 309 (2009)
- [6] T. Glanowski, V. Le Saux, C. Doudard, Y. Marco, C. Champy, P. Charrier, C.M.T., **Under review**
- [7] C. Doudard, S. Calloch, F. Hild, S. Roux, M.M. 42, 55 (2010)
- [8] R. Behnke, M. Kaliske, M. Klüppel, RCT 89, 154 (2016)