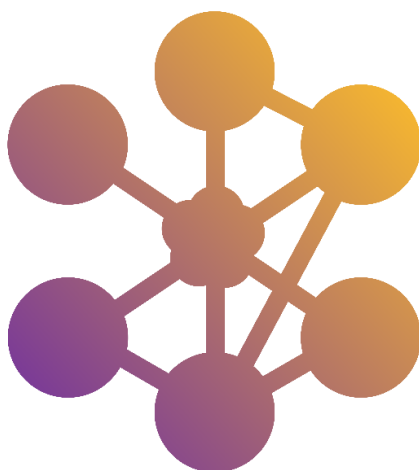


MERCURE

PARIS PORTE D'ORLÉANS

Club Cast3M 2025

28 novembre 2025 – Hôtel Mercure – Porte d'Orléans



Recueil des résumés

<https://www-cast3m.cea.fr/>

Modélisation de la charpente de la cathédrale Notre-Dame de Paris sous charges de vent

Paul Nougayrede

Université de Toulouse

Contact : paul.nougayrede@utoulouse.fr

A la suite de l'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris en 2019, plusieurs modélisations numériques ont été réalisées dans le cadre d'une Convention de Recherche et Développement, entre la Maîtrise d'Ouvrage chargée de la reconstruction et un consortium scientifique (composé d'organismes de recherches universitaires, de laboratoires, d'entreprises spécialisées, de cellules de transferts scientifiques). L'une de ces études, réalisées dans ce cadre exceptionnel, s'est attachée à décrire le comportement mécanique conjoint des charpentes et des murs supérieurs de la cathédrale, lorsque celle-ci se trouve sollicitée par des charges de vent. Plusieurs verrous ont ainsi pu être investigués, notamment au moyen du code de calcul aux éléments finis Cast3m.

En effet, les nombreuses non linéarités inhérentes à la complexité de la structure étudiée (modélisation des joints de mortier de la maçonnerie, de la charpente articulée, des conditions unilatérales de contact entre éléments de charpente et maçonnerie, etc...) ont pu être mises en œuvre dans une modélisation à l'échelle d'une travée dite courante de la cathédrale. L'étude des sollicitations dues aux charges de poids propre, puis aux charges de vents, a permis d'exhiber des comportements originaux, et non nécessairement anticipés par les connaissances usuelles dans le cadre du diagnostic et de la rénovation d'ouvrages similaires. Ce type de modélisation permet donc entre autres d'encourager un dialogue de plus en plus affirmé entre architectes, archéologues, historiens et modélisateurs des structures de génie civil.

Fusion et fissuration du béton en cas d'interaction corium-béton

Clément Pionneau

DES/ISAS/DM2S/SEMT/LM2S

Contact : clement.pionneau@outlook.fr

Dans le cadre de la sûreté des installations nucléaires, des situations accidentelles hypothétiques sont étudiées. L'une d'entre-elles conduit à la fusion du cœur du réacteur et au percement de la cuve. Un mélange en fusion, appelé corium, peut alors se répandre sur un radier en béton, situé sous la cuve. Il est supposé qu'une telle situation s'est produite lors de l'accident de Fukushima. L'autorité de sûreté nucléaire demande alors que des dispositions soient prises pour éviter un percement du radier, ce qui entraînerait une contamination du milieu extérieur. L'interaction entre le corium et le béton est ainsi un sujet d'étude international [1].

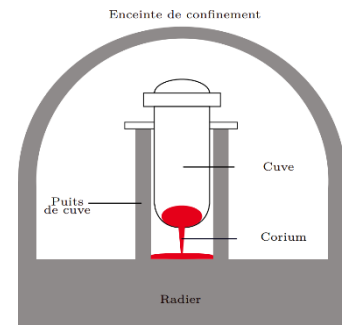


Figure 1 Schéma simplifié d'un accident grave

La température du corium (environ 2400°C) étant supérieure à la température de fusion du béton (environ 1300°C), l'interaction entraîne la fusion de ce dernier. De plus, le fort gradient thermique généré peut provoquer la fissuration de la structure. Un calcul chaîné thermique-mécanique a été mis en place avec Cast3M pour tenter de prédire la position de ces fissures. L'équation de la chaleur non linéaire est d'abord résolue, puis un critère énergétique est utilisé pour supprimer les éléments correspondants au béton ablaté. Un modèle d'endommagement continu (Mazars) est utilisé pour identifier les zones les plus susceptibles de fissurer. Cette méthodologie est appliquée sur un cas expérimental, à échelle réduite. Une simulation utilisant une reconstruction du champ de température à partir des mesures expérimentales est aussi présentée.

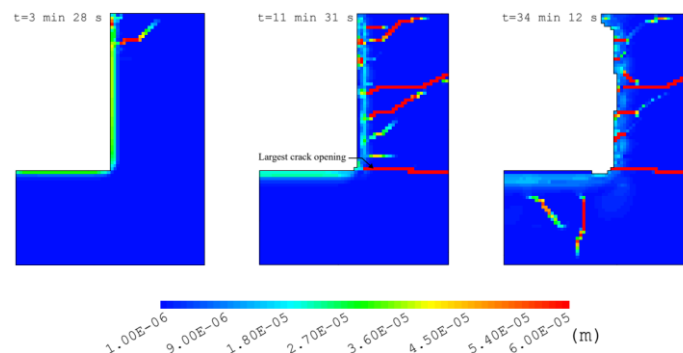


Figure 2 Ouverture de fissure

Références :

[1] State-of-the-Art Report on Molten Corium Concrete Interaction and Ex-Vessel Molten Core Coolability. OECD Publishing, NEA, Paris, 2017

[2] **Clément Pionneau**. Simulation thermomécanique du comportement du béton sous chargement thermique sévère : application au cas de l'interaction corium-béton. Rapport de stage, CEA/DES/ISAS/DMS2/SEMT, Gif-surYvette, 2024

Modélisation mécaniques non-linéaires et vibratoires d'un pont en maçonnerie lors d'un chargement réel in situ

Pierre Morenon, Jules Cinier

LMDC Toulouse

Contact : morenon@insa-toulouse.fr, cinier@insa-toulouse.fr

Le pont d'Osserain est un ouvrage à trois travées de 14 mètres, doté d'arcs surbaissés, caractéristique de la fin du XIX^e siècle, situé dans le département des Pyrénées-Atlantiques. À la suite d'une décision de déconstruction, son instrumentation a été autorisée dans le cadre du Projet National DOLMEN, afin d'en assurer le suivi (déplacements, déformations, fissures et vibrations) et de procéder à un chargement expérimental de 360 tonnes de blocs de béton sur une demi-travée avant une déconstruction finale.

Une modélisation mécanique non linéaire 3D, fondée sur un modèle plastique endommageable anisotrope multicritères (endo3d), a d'abord permis de définir l'essai in situ, tant en matière de positionnement que d'intensité du chargement et d'optimiser le positionnement de certains capteurs. Elle a également servi à définir comment fragiliser l'ouvrage surdimensionné pour favoriser l'apparition de fissures lors de l'essai. Les mesures vibratoires en bruit ambiant effectuées avant chargement, corrélées aux calculs de fréquences propres numériques, ont rendu possible le calage du module d'élasticité de la maçonnerie homogénéisée, valeur ensuite validée par l'amplitude de la flèche observée au début du chargement.

À l'issue de l'essai, l'analyse des données recueillies par l'ensemble de l'instrumentation a permis de mener un exercice de comparaison entre dix modèles mécaniques développés par des bureaux d'études ou des équipes académiques. Parmi ceux-ci, deux modèles implémentés sous Cast3M (endo3d et orthendo_joint, un modèle endommageable à anisotropie initiale de résistances) ont restitué correctement les déplacements, déformations et fissures relevés. Une augmentation numérique progressive du chargement a ensuite permis d'estimer la ruine de l'ouvrage.

L'extraction sélective des actinides (majeurs ou mineurs), ou des lanthanides (terres rares), est d'intérêt stratégique. Le CEA recherche d'une part de nouvelles molécules attractante plus performantes (meilleure sélectivité pour certaines espèces, meilleur rendement d'extraction, etc.), et recherche d'autre part à améliorer les procédés de mise en œuvre à l'échelle industrielle de ces molécules. Dans l'optique du renouvellement de l'usine de La Hague (~2040), le CEA est mis à contribution pour le dimensionnement et l'optimisation des procédés qui seront mis en œuvre. Les colonnes pulsées font parties des appareils qui seront utilisés dans les futurs ateliers. Le comportement hydrodynamique de ce type d'appareil est complexe, il apparaît indispensable de disposer d'un simulateur prédictif que ce soit pour les études amont en R&D (dimensionnement), pour une utilisation ligne durant l'exploitation, ou encore pour la formation des pilotes.

Evaluation des contraintes et des déformations dans les tuyauteries soumises à la stratification thermique

Minh Bao Le
ASNR

Contact : Minh-bao.le@asnr.fr

Des fissures de corrosion sous contraintes ou encore des fissures de fatigue peuvent apparaître sur des lignes auxiliaires connectées au circuit primaire principale des réacteurs nucléaires. L'origine de ces fissures est principalement attribuée aujourd'hui (dans l'industrie nucléaire) aux chargements locaux induits par la pénétration d'un vortex d'eau chaude depuis le circuit primaire principal. Par ailleurs, lorsqu'une ligne comporte un tronçon horizontal, ce dernier peut être soumis à une stratification thermique conduisant à des chargements plus importants sur l'ensemble de la ligne.

Dans l'objectif de mieux comprendre les effets liés à de tels chargements locaux, l'ASNR a développé un modèle aux éléments finis sous Cast3M pour simuler le comportement thermomécanique d'une ligne représentative. Ainsi, ce modèle permet de simuler les chargements associés aux déplacements du front de vortex et à la stratification thermiques tout en permettant in fine une évaluation des critères de fatigue oligocyclique appliqués à la ligne étudiée.

Thermal equilibrium and non-equilibrium in composite materials: A Comparison between DNS and Analytical Homogenization

Stefano Pastore^{(1),(2)}, D. Lasseux⁽²⁾, G. Sciumè⁽¹⁾, S. Dal Pont⁽³⁾

(1) I2M, Université de Bordeaux, Campus Peixotto, 33400 Talence, France

(2) CNRS, I2M, Université de Bordeaux, Campus Peixotto, 33400 Talence, France

(3) CNRS, 3SR, Université de Grenoble Alpes, 38000 Grenoble, France

Contact : stefano.pastore@u-bordeaux.fr

Composite materials are ubiquitous in aerospace, civil, and energy systems, where accurate prediction of transient heat transfer is critical, especially when constituents exhibit large contrasts in thermal conductivity and capacity. Much of the engineering literature assumes local thermal equilibrium between the two phases, and therefore a single-temperature (1T) formulation. However, this approximation can be strongly biased when matrix and inclusions exchange heat on time scales comparable to the macroscopic evolution or when microstructural topology sustains phase-specific temperature gradients [2]. Starting from the physical description at the scale of the microstructure, we derive a two-temperature (2T) macroscopic model via the Volume Averaging Method (VAM). The upscaling procedure yields the heat transfer two-equation model that involves phase-effective conductivity tensors, coupling tensors, and vector terms that represent matrix–inclusion interactions, local temperature-gradient effects, and interfacial exchange [1]. Effective coefficients are computed by solving closure problems on a periodic unit cell representative of the microstructure. This is performed using Comsol Multiphysics. We compare predictions obtained from the 2T upscaled model, implemented in Cast3M, against fully resolved direct numerical simulations (DNS) at the scale of the microstructure—also performed in Cast3M—across ranges of conductivity contrast and anisotropy. The VAM-based 2T model reproduces very well the DNS transients. Moreover, it reveals directional effects of the flux through the full second-order phase-effective tensors. Taken together, these results provide practical selection criteria and a reproducible workflow, from unit-cell computations to macro-scale predictions, for thermally heterogeneous composites.

Références :

[1] **Didier Lasseux and Francisco Valdes-Parada**, Simplifications of macroscopic models for heat and mass transfer in porous media. *Advances in Water Resources*, 197:104899, 03 2025.

[2] **H. Scandelli, A. Ahmadi-Senichault, and J. Lachaud**, Two-temperature ablative material response model with application to stardust and msl atmospheric entries. *Aerospace Science and Technology*, 137:108297, 2023.

Calcul du seuil de dommage thermique oculaire induit par laser

José Garcia

AOR Safety

Contact : jose.garcia@aorsafety.com, garcia9308@outlook.fr

Les valeurs limites d'exposition définies dans les normes de sécurité d'emploi des lasers, dépendent de nombreux paramètres spectraux, spatiaux et temporels et ont été fixées par le passé à l'aide d'expérimentations, plus récemment à l'aide de modèles. Les paramètres d'émission des systèmes laser notamment pour les produits grands publics (systèmes de détection d'endormissement ou de reconnaissance d'identité, d'affichage...) avec des diodes laser peuvent être très variables (durée, fréquence, puissance crête, ...) et les valeurs limites d'exposition ne prennent pas ou de façon incomplète en compte ces dynamiques. Lorsque l'effet thermique est prédominant, l'outil Cast3M est utilisé pour calculer les températures dans les différentes structures oculaires préalablement modélisées et discrétisées. Le but est de confronter les résultats obtenus par ces calculs avec les valeurs limites d'exposition et de vérifier les facteurs de sécurité. En effet la valeur limite n'est pas un seuil de dommage mais est obtenue en appliquant un facteur de sécurité. Le terme source est associé au faisceau laser. Il a donc été nécessaire de développer une procédure spécifique pour prendre en compte un éclairage absorbé en chaque point en fonction de la propagation dans les milieux. Pour cette version seule une approche linéaire d'absorption a été adoptée, hypothèse justifiée par les températures atteintes. Cette élévation de température peut ainsi être calculée en tout point aussi bien pour un faisceau continu en employant la procédure RESO que pour un laser impulsionnel avec la fonction PASAPAS. Dans ce second cas si le laser est impulsionnel répétitif, compte tenu du maillage spatial nécessaire, en effet le faisceau laser peut être focalisé sur quelques micromètres au niveau de la rétine, le calcul pour quelques impulsions laser demeure long. Par exemple pour 4 impulsions de 2 ms à 10 Hz, le temps nécessaire est d'environ 1 h pour une machine standard. Le maillage temporel est moins fondamental. Il utilise un double maillage, plus fin pendant le temps de chauffage par l'impulsion laser que lors du refroidissement entre deux impulsions. Afin de rendre plus souple l'utilisation de ces calculs, un fichier d'entrée des paramètres optiques, du laser et des matériaux, est lu au moyen de la fonction ACQU. Ceci permettra d'effectuer à terme des calculs d'élévation de température sur des matériaux de protection laser à partir d'un maillage générique de type plaques superposées. Toutefois l'élévation de température ne permet pas d'accéder directement au seuil de dommage irréversible, il est nécessaire de fixer un critère de dommage. Classiquement dans les études précédentes, c'est une fonction intégrale d'Arrhenius qui est employée pour en déduire une probabilité de dommage. Toutefois son application pose quelques difficultés car il est nécessaire de faire varier la puissance laser incidente pour atteindre ce seuil de dommage et donc de relancer les calculs. Pour optimiser ce temps de calcul, une procédure particulière a été développée pour interpoler linéairement la puissance associée à ce seuil de dommage. Les résultats qui seront présentés montreront dans quelques cas, l'influence sur les seuils de dommage :

- De la durée d'impulsion et
- De la dimension d'image rétinienne.

Ils seront ensuite comparés aux valeurs actuelles des limites d'exposition.

Un algorithme de maillage anisotrope automatique : Application à la simulation multiphysique d'un arc en soudage Tungsten Inert Gas

Stephane Gounand

DES/ISAS/DRMP/SRMA/LTA

Contact : stephane.gounand@cea.fr

Mots clés: Simulation Numérique du Soudage, Modélisation multi-physique, Magnéto-thermo-hydro-dynamique, Maillage anisotrope, interpolation de métrique, Cast3M

Dans le cadre de la simulation numérique multiphysique du soudage par éléments finis, on rencontre souvent des difficultés de maillage liées aux faits suivants :

- Les outils de soudage peuvent présenter des formes géométriques complexes, de même que les pièces à assembler ;
- Le modèle multiphysique peut imposer des contraintes de taille maximum sur certaines parties du maillage, notamment aux interfaces. On pense par exemple aux surfaces des électrodes qui peuvent héberger un modèle de couche cathodique et anodique ayant une certaine épaisseur et plus généralement aux couches limites présentes dans les solutions des modèles de fluide ;
- Le modèle multiphysique fait intervenir de nombreuses inconnues physiques. Afin d'assurer un temps de calcul raisonnable, on a tout intérêt à maîtriser le nombre d'éléments du maillage.

Cette contribution présente un algorithme de maillage reposant sur la construction d'un champ tensoriel de taille de maille voulue par interpolation de métrique, qui vient ensuite nourrir un mailleur automatique anisotrope puis un modèle multiphysique d'arc de soudage Tungsten Inert Gas (TIG).

Une approche de la modélisation thermomécanique du soudage et de la fabrication additive

Serge Pascal

DES/ISAS/DRMP/SRMA/LTA

Contact : serge.pascal@cea.fr

Introduction

L'objet de cette communication est de présenter l'approche développée dans Cast3M o pour la modélisation thermomécanique du soudage et de la fabrication additive. La modélisation des procédés de soudage et de fabrication additive à l'aide de codes de calcul par éléments finis bénéficie de décennies d'expérience accumulée en calcul de structures, qui ont conduit à disposer de méthodes numériques robustes et éprouvées, de solveurs performants, de nombreuses lois de comportement des matériaux et de données accessibles et validées par l'expérience. Toutefois, la modélisation du soudage et de la fabrication additive présente deux spécificités que l'on ne rencontre habituellement pas en calcul de structures : un apport de chaleur mobile et d'intensité variable dans le temps, et un apport de matière.

Modélisation de l'apport de chaleur

En soudage, bien que l'apport de chaleur soit un flux appliqué sur la surface à souder, celui-ci est généralement modélisé par une source volumique afin de tenir compte des effets hydrodynamiques induits dans le bain de métal en fusion. En soudage à l'arc électrique, le modèle le plus usité est sans doute celui de J. Goldak o mais il en existe de nombreux autres o. La même approche est généralement adoptée pour la modélisation de la fabrication additive o, en particulier pour la fabrication additive fil, dérivée des procédés de soudage. Dans Cast3M, cela a conduit à introduire différents modèles thermiques de source de chaleur que nous présenterons.

Evolution spatiotemporelle de l'apport de chaleur

Il semblerait que la modélisation du déplacement de la source de chaleur n'a pas fait l'objet de travaux académiques particuliers et repose, souvent, sur des fonctionnalités propres au logiciel utilisé, lorsqu'il ne s'agit pas de devoir programmer soi-même l'évolution spatiotemporelle de la source dans une routine externe. Dans ce dernier cas, la modélisation est souvent limitée à des trajectoires relativement simples.

Dans Cast3M, on a fait le choix de modéliser la trajectoire de la source par le maillage d'une ligne orientée, indépendante du maillage massif de la pièce à souder ou à fabriquer. L'évolution temporelle du déplacement de la source le long de cette ligne permet alors de la positionner à tout instant, rendant la modélisation du déplacement de la source indépendante de la discrétisation temporelle du modèle thermomécanique. La donnée de l'évolution temporelle de l'intensité de la source complète sa modélisation et permet de représenter facilement les démarrages et arrêts successifs du dispositif d'apport de chaleur. Cette modélisation de la source de chaleur permet de la positionner et de définir son intensité à tout instant, pour l'appliquer au maillage massif de la pièce à modéliser. La description de la cinématique de l'apport de chaleur et de la variation de son intensité est facilitée par l'utilisation de la procédure SOUDAGE de Cast3M.

Apport de matière

On distingue principalement deux méthodes pour modéliser l'apport (ou le retrait) de matière dans le cas d'une modélisation par éléments finis o :

- La méthode « des éléments discrets » (« quiet element »), qui consiste à utiliser le maillage final de la pièce soudée ou fabriquée mais en attribuant des propriétés « faibles » aux éléments du maillage qui n'ont pas encore été déposés à un instant donné. Ces éléments sont activés au fur et à mesure du calcul en leur attribuant leurs propriétés réelles.
- La méthode « des éléments inactifs » (« inactive element » ou « element birth and death »), qui consiste à ajouter des éléments au maillage pour décrire l'apport de matière. C'est la méthode aujourd'hui privilégiée dans Cast3M.

Cette dernière méthode est mise en œuvre en définissant autant de maillages qu'il y a de pas d'apport de matière. L'évolution temporelle du modèle est décrite par un objet CHARGEMENT de Cast3M, qui peut être instancié à tout instant, indépendamment de la discrétisation temporelle adoptée pour la résolution du modèle thermomécanique. Si le pas d'apport de matière est choisi librement par l'utilisateur, il est tout de même conditionné à la taille des éléments du maillage. A chaque pas d'apport de matière, les champs solutions du problème thermomécanique sont transportés sur le nouveau maillage pour la partie qui est commune au précédent et initialisés à leurs valeurs par défaut pour la partie ajoutée. Les valeurs des champs aux nœuds de l'interface de ces deux parties sont déterminées de manière à assurer la conservation de l'énergie.

Validation

Cette approche a été mise en œuvre dans le cadre de différents travaux menés au Laboratoire des Technologies d'Assemblage (LTA) du CEA ces dernières années 00000. Bien que les modélisations thermiques aient toutes nécessité un recalage à quelques mesures de température, la comparaison des résultats obtenus par le calcul à l'ensemble des mesures de température réalisées en cours de fabrication et de distorsion des pièces après fabrication s'est avérée à chaque fois très satisfaisante.

Références :

[1] Cast3M, <https://www-cast3m.cea.fr/>

[2] Goldak, J., Chakravarti, A. & Bibby, M, A new finite element model for welding heat sources. Metall Trans B, vol. 15, pp. 299–305, 1984. <https://doi.org/10.1007/BF02667333>

[3] Nascimento, E.J.G., dos Santos Magalhães, E. & dos Santos Paes, L, A literature review in heat source thermal modeling applied to welding and similar processes. Int J Adv Manuf Technol, vol. 126, pp. 2917–2957, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11253-z>

[4] Sampaio, R.F.V., Pragana, J.P.M., Bragança, I.M.F., Silva, C.M.A., Nielsen, C.V. & Martins, P.A.F, Modelling of wire-arc additive manufacturing – A review. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, vol. 6, pp. 100-121, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2023.100121>

[5] Lindgren, L. E., Runnemalm, H. & Näsström, M. O, Simulation of multipass welding of a thick plate. Int. J. Num. Methods Eng., vol. 44, n° 9, pp. 1301-1316, 1999. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19990330\)44:9<1301::AID-NME479>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990330)44:9<1301::AID-NME479>3.0.CO;2-K)

[6] Pascal, S. Gounand, S, Modélisation thermomécanique d'un cas d'étude de fabrication additive arc-fil. 15ème colloque national en calcul des structures, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], May 2022, 83400 Hyères-les-Palmiers, France. <https://hal.science/hal-03718305v1>

[7] Artieres, D., Goncalves, D., Pascal, S., Depinoy, S., Esin, V.A, Microstructure-properties relationship in AISI 316L stainless steel produced by Wire Additive Manufacturing

(WAM): experimental study and simulation. AMETIS International Summer School, Jun 2022, Taglio, France, 2022. <https://cea.hal.science/cea-04482511v1>

[8] **Pascal, S., Garnier, M., Garric, M., Le Mercier, J**, Modélisation thermomécanique de la fabrication additive arc-fil d'un tube droit avec Cast3M. 16ème Colloque National en Calcul de Structures, CNRS, CSMA, ENS Paris-Saclay, CentraleSupélec, May 2024, Hyères, France. <https://cea.hal.science/cea-04604172v1>

[9] **Artières, D**, Microstructure et propriétés de l'acier 316L élaboré par fabrication additive par dépôt de fil (WAAM & WLAM) : caractérisation expérimentale et modélisation. Thèse de doctorat, Université Paris sciences et lettres, avril 2025.

[10] **Pascal, S., Boullon, R., Couvant, T., Gonçalves, D**, Effect of the welding path on the residual stress state in multi-pass welding. 28th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Toronto, Canada, August 10-15, 2025.

Influence des contraintes résiduelles sur la propagation de fissures en fatigue

Robin De Bosscher^{(1),(2)}, Cédric Gourdin⁽¹⁾, Catherine Gardin⁽²⁾, Clémentine Jacqueloud⁽¹⁾

(1) DES/ISAS/DM2S/SEMT/LISN, CEA Paris-Saclay

(2) INSTITUT P'/Physique et Mécanique des Matériaux/Endommagement et durabilité, ISAE-ENSMA

Contact : robin.debosscher@cea.fr

Mots clés: Contraintes résiduelles, Fatigue, Méthode des éléments finis, Thermomécanique expérimentale.

Les contraintes résiduelles sont des champs de contraintes auto-équilibrés internes à un composant qui existent en l'absence de chargement extérieur. Elles peuvent être introduites volontairement (par grenaillage, trempe...) ou involontairement par des processus de fabrication (fraisage, soudage...). Selon leur répartition et leur intensité, elles peuvent augmenter ou réduire la durée de vie d'un composant [1].

Afin d'assurer la tenue en exploitation des composants de l'industrie nucléaire même en présence de fissure, il est nécessaire de se référer à des codes d'intégrité des structures permettant leur dimensionnement. Pour les composants soudés, la présence de contraintes résiduelles issues du procédé de soudage doit être prise en compte par les codes. Or même si l'influence des contraintes résiduelles est plutôt comprise dans le cas de la rupture fragile, et qu'elles sont dissipées par l'importante plasticité dans le cas de la rupture ductile, la frontière à partir de laquelle les contraintes résiduelles deviennent négligeables n'est pas déterminée clairement [2] et beaucoup de questions se posent encore pour la propagation en fatigue.

Dans le cas particulier du soudage par faisceau d'électrons, la chauffe très localisée du composant tend à produire des champs de contraintes résiduelles avec de grandes variations sur de petites longueurs, ainsi que des répartitions de contraintes très variables d'un composant à l'autre en fonction de sa taille et du matériau.

Afin de valider les critères de dimensionnement de propagation de fissures par fatigue, tout en réduisant les incertitudes liées au passage des éprouvettes standards aux pièces à échelle de la structure, il est nécessaire de réaliser une campagne expérimentale sur des éprouvettes proches des structures réelles en présence de champs de contraintes résiduelles. Dans le cadre de cette thèse, l'étude se concentre sur l'acier inoxydable 316L, très présent dans l'industrie nucléaire.

Dans ce but, la méthodologie suivante a été mise en place :

- Le développement d'un modèle numérique par la méthode des éléments finis a permis d'étudier la faisabilité de l'introduction de champs de contraintes résiduelles similaires à ceux présents dans les soudures à faisceau d'électrons, ceci par l'application d'un traitement thermomécanique spécifique sur des éprouvettes à l'échelle des structures réelles (Fig 1.a).
- Le développement et la fabrication d'un banc d'essai (Fig 1.b) permettant de produire de manière répétable des champs de contraintes résiduelles (Fig 1.c) avec des répartitions et des intensités différentes pour produire des échantillons permettant de caractériser leur influence sur la propagation de fissures par fatigue.

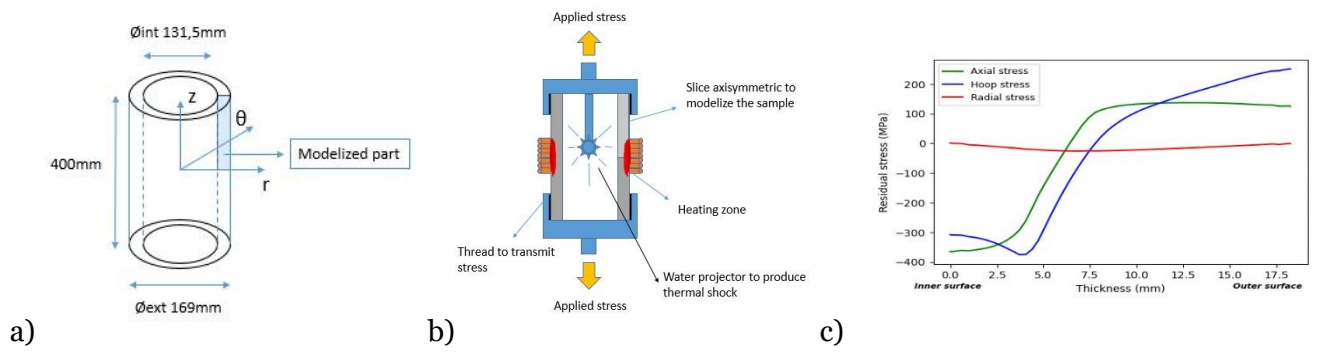


Figure 1. a) Géométrie de l'éprouvette tubulaire, b) Schéma du banc expérimental, c) Contraintes résiduelles à travers l'épaisseur obtenues par modélisation éléments finis à mi-hauteur de l'éprouvette

Références :

[1] **J. Withers, H. K. D. H. Bhadeshia**, Materials Science and Technology, Vol 17 (4) (2001), pp. 366-375.

[2] **S. Chapuliot, A. Dahl, S. Marie, O. Ancelet**, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol 210 (2024).

Un code pédagogique d'optimisation topologique en GIBIANE

François Di Paola(1), Jazon Le Coz(1), G. Le Quillier(2)

(1) Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Études Mécaniques et Thermiques, 91191 Gif-sur-Yvette

(2) Université de Tours, Laboratoire de Mécanique Gabriel Lamé, 37004 Tours

Contact : francois.dipaola@cea.fr

Cette présentation concerne les outils dédiés à l'optimisation topologique disponibles dans Cast3M. Les principaux opérateurs et procédures utiles à l'optimisation en général sont présentés ainsi que les récents développements à ce sujet.

La principale contribution récente est l'opérateur MMA mettant en œuvre la Méthode des Asymptotes Mobiles dans un cadre étendu [1], permettant ainsi de traiter de nombreux problèmes d'optimisation non linéaires sous contraintes. Cet algorithme a notamment été mis en œuvre dans le cadre de l'optimisation topologique, permettant d'étendre les possibilités la procédure générique TOPOPTIM [2].

Ces nouvelles possibilités sont illustrées à travers différents exemples décrit ci-dessous.

- **Benchmark pédagogique**

Deux nouveaux cas tests « top_oc.dgibi » et « top_mma.dgibi », disponibles dans la base de validation, reproduisent le code de référence 88 lignes Matlab [3] appliqué sur une poutre en flexion en 2d plan pour laquelle on minimise l'énergie de déformation (compliance) sous contrainte de fraction volumique maximale. Cet exemple « éducatif » permet à l'utilisateur novice de s'initier à l'optimisation topologique à base de densité. Y sont notamment illustrés le filtrage spatial du champ de sensibilité ou de densité et l'optimisation par Critère d'Optimalité ou par MMA. Cet exemple peut servir de base pour d'autres problèmes d'optimisation topologique (extension en 3d, maillages non structurés, changement de fonction objectif et fonctions contraintes, autres physiques, changement d'optimiseur, ...).

- **Problèmes non convexes**

Le cas test précédent est étendu à des problèmes de *chargement dépendant du design*, comme les forces volumiques (gravité, centrifuges, ...) ou des forces de pression. Ce type de chargement rendent le problème d'optimisation non convexe et sont plus difficiles à résoudre (absence de convergence, plusieurs minimums locaux, dépendance au point de départ). L'optimiseur MMA permet d'obtenir des solutions optimisées (sans pour autant garantir un optimum global).

- **Problèmes multi-contraints**

L'opérateur MMA permet la résolution de problème multi-contraint. Un exemple est donné sur un cas d'optimisation « robuste » avec une contrainte de remplissage [4]. Il s'agit d'imposer une contrainte sur la fraction volumique locale, conduisant à des designs « poreux » plus robustes face aux incertitudes sur les chargements ou à un endommagement de la structure.

- **Changement de fonction objectif : cas d'un mécanisme souple (compliant)**

On illustre ici un exemple d'optimisation de mécanisme souple consistant à maximiser la réponse en déplacement d'une structure soumise à un chargement donné. Ce cas peut servir d'exemple à l'expression de gradient par une méthode indirecte (vecteur adjoint).

- **Seuillage des densités (projection) :**

L'application d'un seuillage des densités, par une fonction sigmoïde, est illustrée ici. Le seuillage a pour but de supprimer les éléments ayant des densités intermédiaires pour réduire leur contribution au problème physique ou faciliter le détourage des solutions.

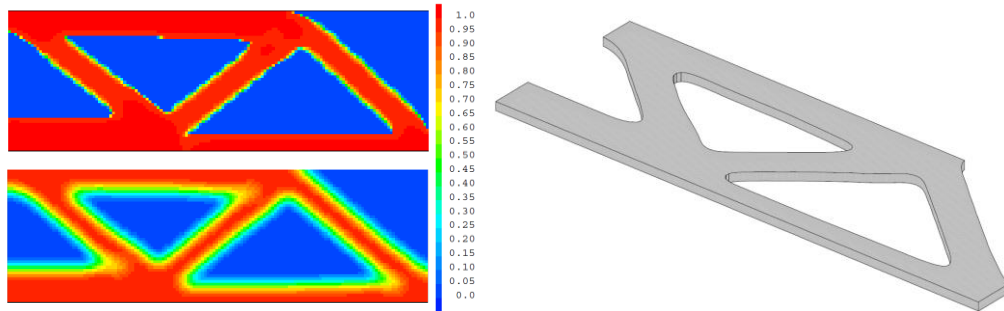


Figure 1 : Design optimisé d'une poutre en flexion 3 points (avec et sans seuillage) puis maillage de la topologie.

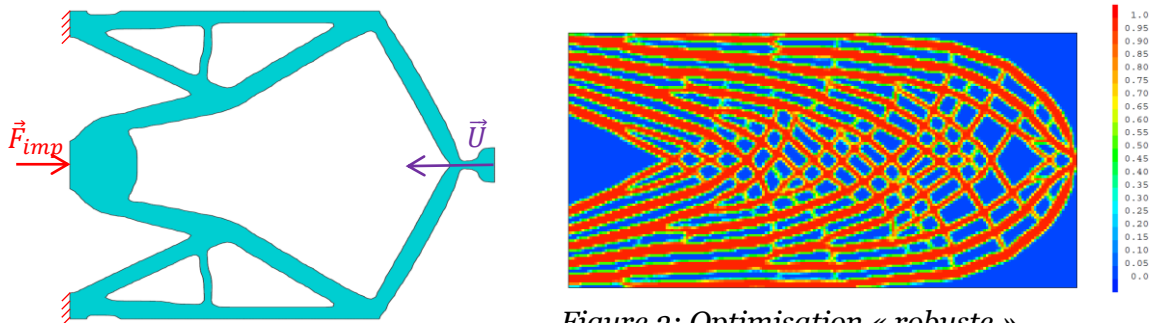


Figure 2 : Design optimisé d'un mécanisme compliant.

Figure 3: Optimisation « robuste » d'une poutre avec contraintes sur les fractions volumiques globale et locale.

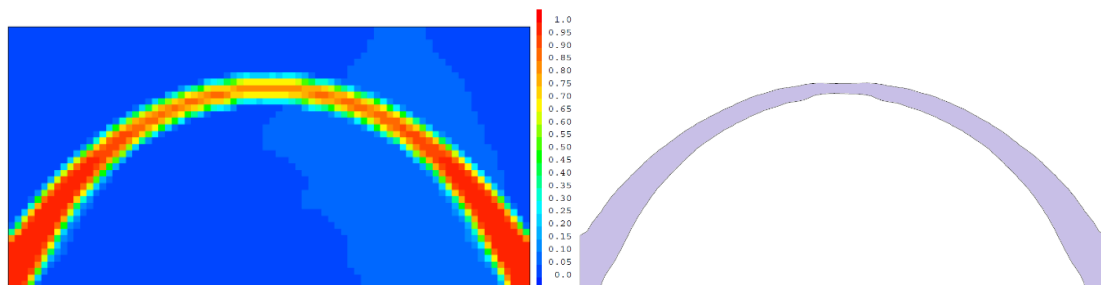


Figure 4 : Optimisation d'une structure encastree aux coins inférieurs et soumise uniquement à son poids propre puis maillage de la topologie.

Références :

[1] **Krister Svanberg**, *MMA and GCMMA – two methods for nonlinear optimization*, (2017) <https://people.kth.se/~krille/mmagcmma.pdf>

[1] **G. Le Quilliec**, *Procédure d'optimisation topologique TOPOPTIM Version 2*. Club Cast3M (2017)

[1] **E. Andreassen, A. Clausen, M. Schevenels, B. S. Lazarov, O. Sigmund**, *Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code*. Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 43 (2011)

[1] **J. Wu, N. Aage, R. Westermann, O. Sigmund**, *Infill Optimization for Additive Manufacturing—Approaching Bone-Like Porous Structures*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 24 (2018)

```

`/shdddhy+.
.sdhs+ooshdmNh:
-mdo/--.-:+ydNNN+
dms/-.....:/odmNNN-
.Nmy+:-:-:/oydmNNN+
mmdyso+ooyhmmNNNN-
:mNmdddddmmNNNNNy/-`
.---.`
`/ydddddmh+.
:ddy+///+shmNmo`
/mho:-...-/oymNNy
mms+:-...-/ohmNNN/
`Nmhs+/:/+oydmNNN+
hNmddyysyhdmmNNNN/`
.hNNmmmmmmNNNNNNs++/-
`+hmNNNNNNNNds:oyyo+++..`osohh+`.-:./+sys/sdNNNNNNNNds.
`-+syyyso:.`-+sssoos+ohyo/ohhyss//oyyo-`..++mhsyyys+:.
.:ods-.:odms--/ymmy/.`-++dy`
`ms+ooymmyosydNN/-/+ds`
smy:.+h:-+hNNd`:/+do
`-:dh+/hh+/+ydNNo+/.`:/od+
`-+syyyso:.`.-:./oyhdmmmNNmmNNmhss+ooom/`-+syyyso:.
`+hdysoosydms::/+sys/.`./sydsmhs+-.:sysoos+/+hhssoosshmNds.
.hmy/:--:/shmNmoyyo:`s/d/`./:dhsysddo/----/oydNNm:
hnh+:...-:/oymNNN/`y/d/`-:/hy`..mms/-...-:/+ydNNm.
`Nmho/:--:/+ydmmNN+`y/d/`-:/hs`..Nms+:--:/+shdNNNN/
mNmhysoosyhdmmNNNN/`s/d/`:/d+`NmdysoosyhdmmNNNN-
/mNmdddddmmNNNNNh+:.`y+d+`:/od/`-:/oNNmdddddmmNNNNNNs
:dmNNNNNNNNNNmhy+++/-`-+yhdhddydyd-`.://oyhdmNNNNNNNNNNm+
`s:sdmmmmmy+.`oysoo+oydy+///+shmNmo:/+shs/.`/sdmmmmmy+.
`.-.`-+yhmh+:.-:/shmNNhho:`.-.
mmy+:.-:/shmNNN-
.Nmho+///+oshdmNNN+
dNmddyhyhdmNNNNN-
-mNNmmmmmmNNNNNNN+
.smNNNNNNNNNNNh-
`/shddhs+.

```