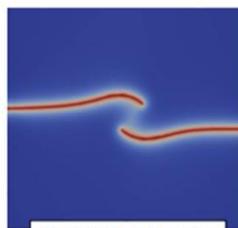
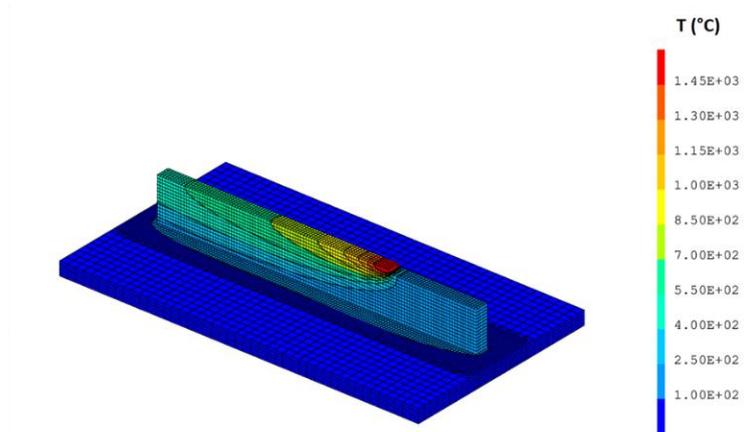


Club Cast3M 2022

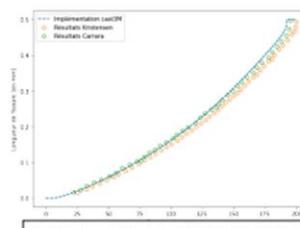
25 Novembre 2022 – Hôtel Mercure Paris Porte d'Orléans



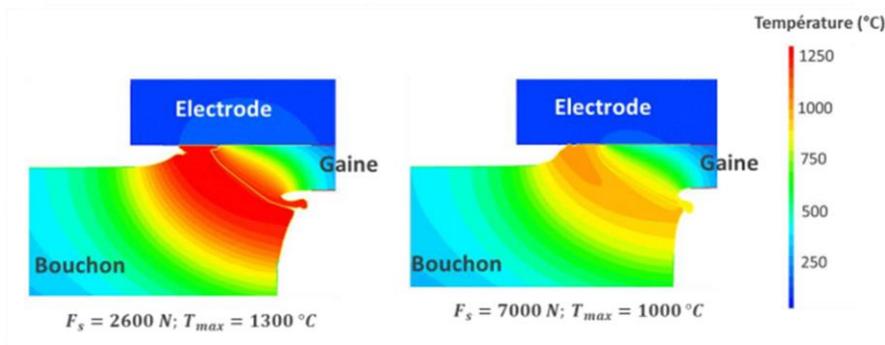
Cas 2D de fissure « en passant »



Maillages successifs en AMR



Comparaison d'un benchmark 2D avec la littérature



Recueil des Résumés



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

En partenariat avec



Sommaire des présentations

A Multiscale and Thermomechanical Modeling of Shape Memory Alloys using Cast3M.....	4
Modélisation du comportement thermomécanique de pièces en acier 316L produites par fabrication additive arc-fil (WAAM)	6
Modelling of Rigid Inclusions Foundations to Investigate the Failure Envelope in the H-M-V Space	8
Simulation numérique de soudage par résistance du gainage de combustible en acier ODS pour les réacteurs nucléaires de 4ème génération (RNR-Na).....	10
Modélisation d'un appareil d'extraction bi-phasique en génie des procédés	12
Numerical Modelling of Micro-thrusting Through the Pulsed Laser Ablation of Metals.....	14
The Numerical Study of Crack Propagation on Monocrystalline Silicon Wafers	16
Modélisation numérique de propagation de fissure en fatigue par une approche couplée champ de phase, raffinement adaptatif de maillage et saut de cycle	18
Prise en compte de la condition de stabilité dans Cast3M	20
Modélisation 3D de la rupture par coalescence des fissures sous pression au sein du procédé Smart CutTM avec la méthode X-FEM.....	22
Calcul des voûtes de Notre-Dame de Paris	24
Nouveautés Cast3M	26



A Multiscale and Thermomechanical Modeling of Shape Memory Alloys using Cast3M



Xiaofei JU, Ziad MOUMNI
ENSTA-Paris

A multi-physics and multi-scale constitutive model is developed to describe the thermomechanical behavior of pseudoelastic NiTi Shape memory alloys (SMAs) and is further implemented through a user-defined subroutine UMAT in CAST3M. In order to address the intrinsic mechanisms related with fatigue at microscale and to provide more physics background for fatigue assessment of SMAs, the micromechanical model is constructed based on crystal plasticity and finite strain theory. It is worth noting that the model includes, for the first time in the literature, maximum inelastic mechanisms influencing the fatigue behavior of NiTi SMAs: martensitic transformation, deformation slip in austenite at high temperature, deformation twinning in martensite at large strain, transformation-induced plasticity as well as thermomechanical coupling. The model is first developed in the single crystal scale to predict the monocyclic deformation behavior. Numerical implementation of the model is performed through adding user-customized constitutive model in an interface of CAST3M. Then the proposed model is generalized to capture the main features of cyclic response of SMAs through the introduction of new internal variables and evolution laws. After that, due to the wide application of polycrystalline SMAs, the model proposed is further extended to describe the thermomechanical response of polycrystalline SMAs. The texture of polycrystalline NiTi is taken into consideration and implemented by introducing Euler angles as material properties behind the keyword 'C MATERIAU' in the syntax of the MODE operator. Furthermore, variables related with microstructural changes, such as dislocation density and corresponding stored energy are introduced in the model. The simulated evolution of these parameters provides the basis for further fatigue analysis. A series of simulations are carried out to verify the proposed models under various loading conditions. The robustness of the model is attested by a good fit between simulation results and the experimental observations in literature.

Modélisation du comportement thermomécanique de pièces en acier 316L produites par fabrication additive arc-fil (WAAM)



Damien ARTIERES
CEA Saclay

Le procédé de fabrication additive arc-fil ou WAAM pour *Wire Arc Additive Manufacturing* permet la réalisation de pièces par dépôt direct de métal fondu tout en minimisant les pertes de métal d'apport, avec un taux de dépôt supérieur aux procédés de fabrication additive avec poudre métallique [1]. Les paramètres du procédé (vitesse de dépôt v , vitesse d'apport de fil v_f , puissance de l'arc électrique P , trajectoire, refroidissement $t_{\text{interpasse}}$...) influent fortement sur l'histoire thermomécanique subie par la pièce fabriquée, et en conséquence sur sa géométrie, sa microstructure et ses propriétés mécaniques [2,3]. L'objectif du travail est d'étudier l'impact des paramètres du procédé WAAM sur les caractéristiques macroscopiques et microscopiques de monocordons et murs de 20 couches réalisés en acier inoxydable 316L. Les analyses sont basées sur des caractérisations expérimentales et sur des simulations thermiques (Figure 1) puis mécaniques réalisées avec le logiciel de calcul par éléments finis Cast3M [4]. Les simulations développées permettent d'anticiper la qualité de fabrication en fonction des paramètres procédé appliqués. Dans ce travail, les résultats numériques sont comparés aux réalisations expérimentales menées en parallèle. Le suivi du champ thermique numérique contribue à estimer les variations de température locales, les zones fondues et l'accumulation de chaleur dans la pièce. Plusieurs post-traitements sont également réalisés. À l'échelle du cordon, ces derniers permettent de prédire la faisabilité du dépôt et de comparer l'influence des paramètres opératoires sur l'estimation de la zone fondue. À l'échelle microscopique, ils permettent d'estimer la vitesse de refroidissement au cours de la solidification et de déterminer le temps passé par la pièce dans la plage de température 500-900 °C, favorable à la précipitation de carbures nocives aux propriétés du matériau [5]. Finalement, le modèle mécanique permet d'anticiper les déformations macroscopiques dans la pièce et l'éventuelle nécessité de traitements thermiques selon le taux de contraintes résiduelles.

Références : [1] T. DebRoy, T. Mukherjee, et al., *Nat. Mater.*, 18, 10, (2019), 1026-1032 [2] W.E. Frazier, *J. Mater. Eng. Perform.*, 23, 6, (2014), 1917-1928 [3] A. Dass, A. Moridi, *Coatings*, 9, 7, (2019), 418 [4] Cast3M, <http://www-cast3m.cea.fr/>. [5] B. Py, *Ph.D. thesis* (2022).

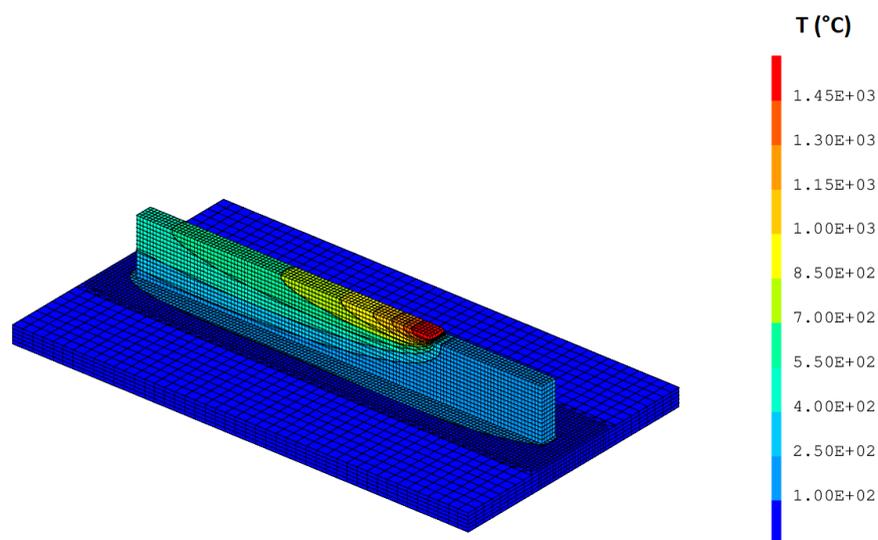


Figure 1. Modélisation du champ de température au cours de la réalisation d'un mur de 20 passes, réalisée à partir des paramètres expérimentaux ($P = 3000 \text{ W}$, $v = 200 \text{ mm.min}^{-1}$, $v_f = 3750 \text{ mm.min}^{-1}$, $t_{\text{interpasse}} = 100 \text{ s}$).

Modelling of Rigid Inclusions Foundations to Investigate the Failure Envelope in the H-M-V Space

Ramon ALCALA OCHOA
Ecole Centrale Nantes

This work focuses on identifying the failure envelope of a shallow foundation on soft soil reinforced by Rigid Inclusions (RI). This failure envelope is defined on the vertical force (V), bending moment (M) and horizontal force (H) space, so different complex load combinations are needed. A complete numerical nonlinear Finite Element Method (FEM) model is simulated and verified based on experimental results. The parameters of the Drucker-Prager model for the load transfer platform and the Modified Cam-Clay for the clay are first calibrated by triaxial and oedometer tests, respectively. For validation, vertical bearing capacity 3D FEM tests are simulated with and without the presence of RI using the experimental data of a static centrifuge test conducted at University Gustave Eiffel (Centrif-UGE) in the framework of the French national project - ASIRIplus_SDS. Parametric studies are performed considering typical configurations for this type of foundation. Finally, a simple analytical formula is proposed to describe this 3D failure envelope in V-M-H space.

Simulation numérique de soudage par résistance du gainage de combustible en acier ODS pour les réacteurs nucléaires de 4ème génération (RNR-Na)

Mohamed MABROUKI
CEA Saclay

Les alliages ferrito-martensitiques ODS (renforcés par une distribution nanométrique d'oxydes) font partie des matériaux candidats à la fabrication de pièces pour le gainage des combustibles de réacteurs nucléaires de 4ème génération. L'assemblage type « bouchon-gaine » se fait par le procédé de soudage par résistance (SPR) en bout (Figure 1). La maîtrise du SPR pour de nouvelles configurations de soudage (matériaux et géométries des pièces à souder) peut être atteinte à l'aide des simulations numériques multi-physiques.

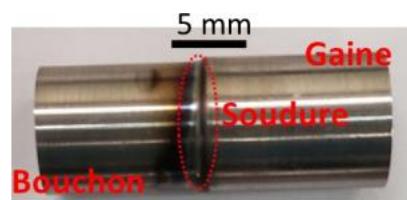


Figure 1. Assemblage bouchon-gaine obtenu par soudage par résistance.

Dans ce contexte, une simulation multi physique du SPR est développée à l'aide du logiciel Cast3M. Cette simulation prend en compte les interactions entre les phénomènes électriques, thermiques et mécaniques, ainsi que les phénomènes de contact électro-thermo-mécaniques entre les pièces. De plus, une procédure de remaillage automatique au cours de calcul, développée dans le cadre de cette étude, est utilisée dans cette simulation. Cette procédure permet de gérer les grandes déformations et de déterminer précisément les cycles thermo-mécaniques subis par le matériau lors du procédé. Les simulations numériques du SPR permettent, entre autres, de comprendre et mieux maîtriser le déroulement du procédé de soudage en fonction des paramètres opératoires utilisés (Figure 2). Ces simulations permettent également d'optimiser les paramètres opératoires pour les matériaux à souder. Les comparaisons entre les essais expérimentaux de soudage et les simulations numériques montrent que le modèle décrit correctement le déroulement du soudage. La corrélation entre les sollicitations thermomécaniques prédites par modèle numérique permet d'apporter des éléments de compréhension sur les origines d'apparition des différentes microstructures et défauts de soudage.

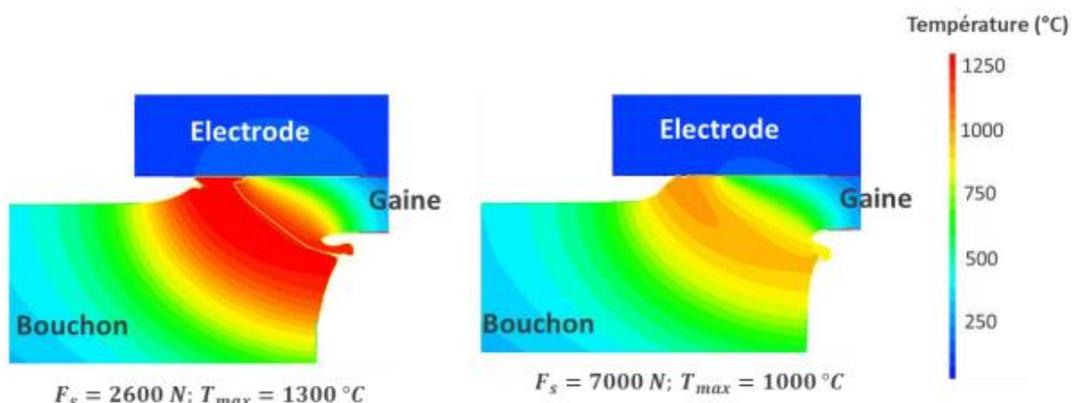


Figure 2. Effet de la force de soudage sur le champ de la température au moment de soudage

Modélisation d'un appareil d'extraction bi-phasique en génie des procédés



Clément BERTHINIER
CEA Marcoule

Résumé : La séparation sélective d'espèces chimiques d'intérêt peut se réaliser à l'aide de différents procédés. Celui qui est retenu pour ce travail est l'extraction liquide-liquide en colonne pulsée mêlant deux phases non miscibles (phase aqueuse et phase organique). L'une des phases est continue (connexe) tandis que l'autre est dispersée (sous forme de gouttes isolées). Les espèces que l'on souhaite séparer arrivent dans une phase et par le jeu des affinités chimiques passent sélectivement (et idéalement quantitativement) dans l'autre phase. Ce travail consiste à modéliser d'une part l'écoulement hydraulique diphasique dans un tuyau et d'autre part la diffusion, le transport, la coalescence et la rupture des gouttes via un bilan de population multidimensionnel. Ces deux physiques sont fortement couplées et doivent être résolues ensemble dans un schéma numérique itératif. La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre les équations aux dérivées partielles en transitoire. Le logiciel Cast3M (<http://www-cast3m.cea.fr/>) dispose de tout l'arsenal numérique nécessaire pour réaliser cette étude. Les équations de conservation, l'algorithme de convergence pour le couplage fort, les premiers résultats obtenus ainsi que les perspectives de développement de l'outil sont présentés.

Numerical Modelling of Micro-thrusting Through the Pulsed Laser Ablation of Metals

Carl TAMERIAN
American University of Beirut

Numerical modelling of micro-thrusting through the Pulsed Laser Ablation of metals (Carl Tamerian, Christopher Nahed, and Ghassan Antar) Satellite propulsion or maneuvering systems are required to be small, cost-efficient, and robust, which has recently increased the interest in developing micro-thrusters. Modern research focuses on using high-intensity pulsed nanosecond laser beams to generate the required thrust, in a process known as Pulsed laser Ablation (PLA). This process removes mass by irradiating a target zone of the base material. The energy of the laser intensely heats the target material, causing rapid phase change from solid to liquid to vapor, and even reaching the plasma state. The ejection of the ablated material generates a micro-newton thrust in the opposite direction as per the momentum conservation principle. The purpose of this project is to simulate the whole process, and the recoil thrust that is generated by the ablation of a target. It is complemented by an experimental study where the measurement of the ablated material is compared to the simulation. The finite element software CAST3M is used to simulate the heat flux interaction with the target. In our numerical model, the temperature field is calculated by solving the energy balance equation with a laser beam modelled as a volumetric heat source with a Gaussian intensity distribution in space and time. Various simulations are performed by varying the thermal and optical properties of the metal target. This allows us to deduce the selection of the target material with optimal properties for our application. Moreover, we implemented two time resolutions in order to resolve the ablation on one hand, and the time between two pulses on the other. This takes into account the possibility of having multiple laser pulses. Future modelling work will include modelling the full ablation phenomenon including all the phase changes for multiple pulses. The crater depth and the recoil force will be compared to the experiment.

The Numerical Study of Crack Propagation on Monocrystalline Silicon Wafers

Zineb BOULAAJAJ
INSA Lyon

To model the rapid crack propagation on monocrystalline silicon, we first defined all of the numerical features that might intervene and impact the onset and the evolution of the crack speed. From the experimental measures, it was reported that when undergoing cleavage failure, the observed crack velocities were nearing the Rayleigh wave speed. To account for the rapid variation of the crack shape, it seemed crucial to use an explicit time integration scheme. This explicit characteristic of our model is combined with the fracture approach XFEM to accurately represent the abrupt changes and the interaction of the waves with the crack. On the course of this study, only Griffith principle is used as a crack initiation criterion. The propagation is governed by the excess of energy, that is at a later stage converted to newly crack surfaces. To be able to compare our numerical results with the experimental data, we adopted a 3D model. Initially, we intended on capturing the geometry of through-thickness cracks when the specimen is subjected to a bending test. However, for simplification purposes a tensile loading is applied and the crack is set to propagate along a straight line. The discontinuous enrichment within XFEM is considered while lumping the mass matrix [1]. However, our model omits the singular enrichment and the silicon is treated as an isotropic material despite its inherent anisotropy.

References [1] Menouillard, T., R'ethor'e, J., Combescure, A. and Bung, H., "Efficient explicit time stepping for the eXtended Finite Element Method (X-FEM)", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol 68, 911– 939 (2006).

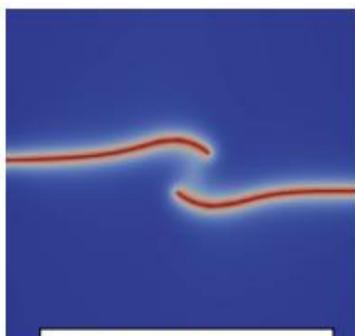
Modélisation numérique de propagation de fissure en fatigue par une approche couplée champ de phase, raffinement adaptatif de maillage et saut de cycle

Adrien JACCON
CEA Saclay

Ces dernières années, la modélisation numérique de propagation de fissure par la méthode champ de phase a beaucoup gagné en popularité pour sa capacité à traiter des cas de fissuration complexe avec une bonne précision et en s'affranchissant des problématiques de remaillage. Toutefois, le traitement diffus de la fissure implique une discrétisation spatiale très fine pour capter l'important gradient des quantités dans la zone endommagée. Le nombre de degré de liberté qui en résulte et la résolution du problème non linéaire champ de phase implique un très important temps de calcul qui limite l'efficacité de la méthode. Face à ces problématiques, cette thèse s'attache à permettre l'exploitation de la méthode sur des cas industriels de propagation de fissure de fatigue en accélérant les calculs grâce à l'optimisation de la discrétisation spatiale avec le raffinement adaptatif de maillage (AMR) et l'optimisation de la discrétisation temporelle avec une procédure de saut de cycle.

Nous implémentons sur Cast3M une approche étagée du modèle champ de phase adaptée à la propagation de fissure par fatigue, et implémentons séparément des procédures d'AMR et de saut de cycle. Pour permettre un gain encore plus important, un couplage AMR/saut de cycle est proposé et en cours d'étude afin de permettre l'optimisation des paramètres. Ces implémentations sont validées sur plusieurs benchmark 2D de la littérature, et plusieurs perspectives de cas 3D et comparaison expérimentale sont en cours.

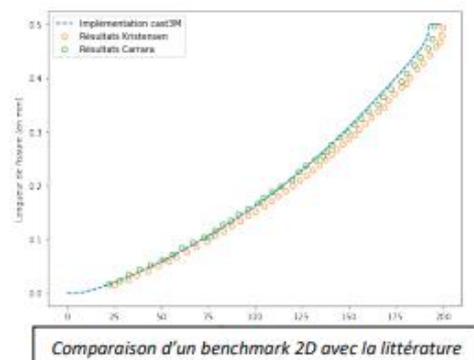
L'outil numérique est intégralement basé sur les opérateurs de Cast3M. Une procédure de résolution adaptée au schéma champ de phase est implémentée pour la calcul d'un cycle et l'opérateur RAFF est utilisé pour les tâches de remaillage en AMR.



Cas 2D de fissure « en passant »



Maillages successifs en AMR



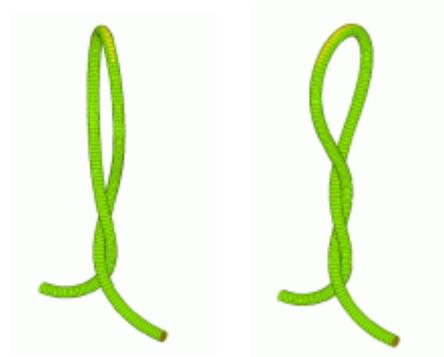
Comparaison d'un benchmark 2D avec la littérature

Prise en compte de la condition de stabilité dans Cast3M



Pierre VERPEAUX
CEA Saclay

La prise en compte des non linéarités entraîne fréquemment l'apparition d'instabilités dans le calcul, locales ou globales, et le plus souvent associées à une perte d'unicité de la solution. La conception des structures permet souvent de passer ces instabilités et de retrouver un état d'équilibre stable. Il est nécessaire de prendre des précautions particulières dans Cast3M pour ce type de calcul afin de ne pas rester verrouillé sur les branches instables et de suivre les solutions expérimentales. Cette présentation illustrée par un exemple simple montrera les modifications faites dans l'algorithmme non linéaire programmé dans UNPAS,.



Modélisation 3D de la rupture par coalescence des fissures sous pression au sein du procédé Smart Cut™ avec la méthode X-FEM

Esso-Passi PALI
INSA Lyon

Il a été montré que la coalescence des fissures circulaires sous pression conduit au contrôle du phénomène de la rupture du silicium dans le procédé Smart Cut™ utilisé pour la fabrication des plaques de silicium sur isolant SOI (Silicon-On-Insulator) [1]. Cette rupture survient au cours du recuit d'un substrat donneur préalablement oxydé, implanté d'ions hydrogène puis collé à un substrat receveur [2]. Dans cette étude, nous avons proposé un modèle numérique 3D visant à simuler la propagation quasi-statique des fissures sous pression interne ainsi que leur coalescence à partir de la méthode X-FEM [3] dans cast3m. La discrétisation de la fissure est basée sur les level sets (définition implicite de la fissure) [4] et la triangulation de la surface de la fissure (définition explicite) [5, 6]. Le chargement, équivalent à la pression de gaz H₂ interne des fissures est appliqué normal aux interfaces des fissures. Le maillage fractal 3D a été implémenté dans cast3m avec un raffinement local de la zone d'intérêt pour être adapté à la géométrie simplifiée du SOI [7] et un gain considérable en temps de calcul peut être obtenu comparativement aux maillages réguliers. L'intégrale d'interaction modifiée a été adaptée au chargement appliqué pour extraire les facteurs d'intensité des contraintes FICs en se basant sur les travaux antérieurs effectués par B. Trollé [8] dans cast3m avec la méthode X-FEM. Les résultats numériques comparés aux solutions analytiques sont concordants avec une erreur relative moyenne acceptable. Les critères de propagation des fissures sont basés sur le critère énergétique de Griffith [9] avec les hypothèses de la mécanique élastique linéaire de la rupture. Un algorithme a ensuite été implémenté dans cast3m basé sur la méthode implicite d'Euler pour prédire la pression dans une fissure au cours de sa propagation à partir d'une loi de comportement en pression préalablement définie. Les résultats ont également été comparés à la solution analytique d'une fissure circulaire isolée sous pression dans un massif infini avec une erreur relative moyenne inférieure à 1% [7]. Nous avons enfin mis en place un modèle 3D de propagation puis de coalescence de deux fissures [7] en se servant de la définition implicite et explicite des fissures. Une analyse qualitative a été effectuée permettant de justifier des comportements des fissures expérimentalement observés au cours de leur évolution dans le Smart Cut™ [1]. Le modèle mis en place constitue un point de base pour l'évaluation des critères de coalescence des fissures ainsi que la rugosité post-fracture et post-coalescence dans le procédé Smart Cut™.

Références :

- [1] L. Colonel, F. Mazen, D. Landru, O. Kononchuk, N. Ben Mohamed, and F. Rieutord. In situ observation of pressurized microcrack growth in silicon. *Physics Status Solidi A*, 221, 2021.
- [2] D. Massy, F. Mazen, S. Tardif, J. D. Penot, J. Ragani, F. Madeira, D. Landru, O. Kononchuk, and F. Rieutord. Fracture dynamics in implanted silicon. *Applied Physics Letters*, 107(9):092102, August 2015. Publisher: American Institute of Physics.
- [3] N. Moës, J. Dolbow, and T. Belytschko. A finite element method for crack growth without remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 46(1):131–150, 1999.
- [4] A. Gravouil, N. Moës, and T. Belytschko. Non-planar 3D crack growth by the extended finite element and level sets-Part II: Level set update. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 53(11):2569–2586, April 2002.
- [5] B. Prabel, A. Combescure, A. Gravouil, and S. Marie. Level set X-FEM non-matching meshes: application to dynamic crack propagation in elastic-plastic media. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 69(8):1553–1569, 2007.
- [6] T.-P. Fries and M. Baydoun. Crack propagation with the extended finite element method and a hybrid explicit-implicit crack description: XFEM with a hybrid explicit-implicit crack description. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 89(12):1527–1558, March 2012.
- [7] E. Pali, A. Gravouil, A. Tanguy, D. Landru, and O. Kononchuk. Three-dimensional X-FEM modeling of crack coalescence phenomena in the Smart Cut™ technology. *Finite Elements in Analysis and Design*, 213:103839, January 2023.
- [8] B. Trollé. Simulation multi-échelles de la propagation des fissures de fatigue dans les rails. PhD thesis, 2014.
- [9] A.-A. Griffith and G. I. Taylor. VI. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 221(582-593):163–198, January 1921. Publisher: Royal Society.

Calcul des voûtes de Notre-Dame de Paris

Maurizion BROCATO, Paul NOUGAYREDE
ENSA Paris-Malaquais

A la suite de l'incendie de la cathédrale Notre Dame de Paris du 15 avril 2019, un Groupe de Travail consacré aux calculs de structures a été constitué au sein du Chantier Scientifique pour assister la maîtrise d'œuvre sur les problématiques de restauration et de reconstruction. Dans ce cadre, un modèle éléments finis bloc à-bloc avec interfaces de la voûte sexpartite du chœur et de ses appuis (arcs-boutants) a notamment été réalisé par le laboratoire GSA à l'aide du logiciel Cast3M 2021. La stratégie de modélisation globale consiste à considérer séparément dans le traitement des résultats les trois éléments principaux qui constituent la travée du chœur : la voûte au départ de ses tas de charge, l'appui pile forte et l'appui pile faible.

Dans un premier temps, la transcription de la géométrie depuis le nuage de point post-incendie initial jusqu'à un maillage Cast3M tétraédrique des 953 blocs de pierres et un maillage triangulaire des interfaces de joints modélisées en 2D nécessite un certain nombre d'étapes de traitement géométrique. En particulier, un programme a été développé permettant la conversion d'une géométrie de blocs 3D quelconque dessinée sur le logiciel Rhinocéros en un maillage avec interfaces de joints compatibles sur Cast3M.

La modularité des fichiers de calculs a permis de simuler plusieurs cas de charges avec différentes hypothèses. L'incendie a par exemple été simulé par une dégradation progressive du module d'Young des blocs de pierre dans l'épaisseur de la voûte, avec une dégradation maximale en extrados. D'autres types de simulations et chargements ont également pu être réalisés et sont encore en cours : l'effet d'une charge complémentaire de plomb fondu sur les extrados des tas de charge, les déplacements imposés des interfaces entre appuis et voûte pour obtenir leurs courbes de fonctionnement respectifs, simulation d'une solution de confortation consistant en une chape endommageable placée en extrados des voutains.

Pour obtenir ces résultats, des ajustements successifs ont été apportés dans une démarche itérative à la procédure PASAPAS par défaut notamment concernant les critères de convergence. Les résultats obtenus ont ensuite pu être comparés dans un benchmark avec les deux autres modélisations du Groupe de Travail Structure du Chantier Scientifique : une modélisation bloc-à-bloc aux éléments discrets (LMGC90) et une modélisation en matériau homogénéisé continu avec modèle d'endommagement (Code_Aster).

Nouveautés Cast3M

François DI PAOLA, Stéphane GOUNAND
CEA Saclay

Club Cast3M 2022

25 Novembre 2022 – Hôtel Mercure Paris Porte d'Orléans

```

      \shdddhy+.
      .sdhs+ooshdmNh:
      -mdo/--.-:+ydNNN+
      dms/-.....:/odmNNN-
      .Nmy+:-:-:/oydmNNN+
      mmdyso+ooyhmmNNNN-
      :mNmdddddmmNNNNNy/-`
      .----.`
      \ydddddmh+.
      :ddy+///+shmNmo`
      /mho:-...-/oymNNy
      mms+.....-/ohmNNN/
      `Nmhs+/::/+oydmNNN+
      hNmddyysyhdmmNNNN/`
      .hNNmmmmmmNNNNNs++/-`
      `+hmNNNNNNNNds:oyyo+++`
      `--+syyyso:..`
      .:ods-.:odms--/ymny/.`
      `ms+ooymmyosydNN/`
      smy:..h:..+hNNd`
      `-.:dh+hh+/+ydNNo+/.`
      `--+syyyso:..`
      `+hdyssoosydmms:./+sys/.`
      .hmy/:-.-:/shmNmoyyo:`
      hmh+.....-:oymNNN/`
      `Nmho/:-:-:/+ydmmNNN+
      mNmhysoosyhdmmNNNN/
      /mNmdddddmmNNNNNh+..`
      :dmNNNNNNNNNNmhyss+++/-`
      `:sdmmmmmmmy+.`
      .----.`
      -+yhmh+:-...:/shmNNhho:`
      mmy+:-...:+shmNNN-
      .Nmho+///+oshdmNNN+
      dNmddyysyhdmmNNNN-
      -mNNmmmmmmNNNNNNN+
      .smNNNNNNNNNNh-
      \shdddhs+.

```



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

En partenariat avec

