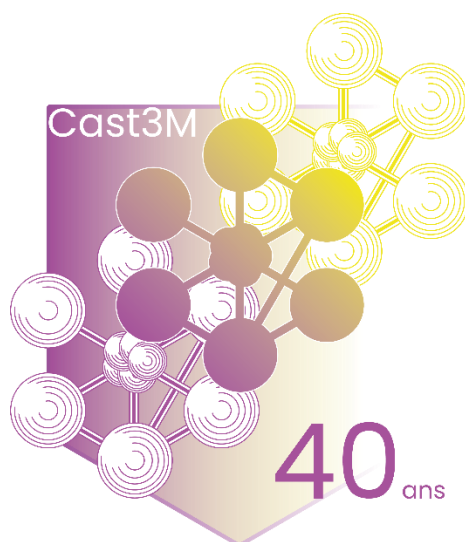


Club Cast3M 2023

24 novembre 2023 – Tour Montparnasse – Paris



Recueil des résumés

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

Concrete poromechanics: implementation of an hygro-thermo-viscoelastic-damage formulation in Cast3M

Giuseppe Sciùmè^(1,2), Stefano Dal Pont⁽³⁾

(1) I2M – Institut de Mécanique et d'Ingénierie, Université de Bordeaux, Bordeaux, France

(2) Institut Universitaire de France (IUF)

(3) 3SR – Laboratoire Sols, Solides, Structures, Risques, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

Contact : giuseppe.sciume@u-bordeaux.fr, stefano.dalpont@3sr-grenoble.fr

Keywords: hydration/dehydration, drying, damage, cracking, shrinkage, creep.

Accurate prediction of concrete behavior is crucial for designing strategic civil engineering structures such as bridges, concrete dams, nuclear power plant reactor containments, and tunnels. Despite a history spanning two thousand years, concrete remains among the most challenging materials to understand and model. Advances in concrete mixtures, incorporating non-conventional binders, additives, low-weight aggregates, polymer fibers, etc., contribute to this complexity. However, the main reason resides in the mesoscale and microscopic structure of concrete: the connection between coarse aggregates and cement paste strongly affects the material behavior and often constitutes the “weak link” where failure initiates; furthermore, cement paste has a porous and chemically active nature with capillary and adsorbed water strongly affecting the global behavior of the material (shrinkage, creep, etc.). The presence of water and moisture transport within the pores gives critical importance to the time dimension for assessing concrete performance. Therefore, knowledge of environmental conditions during the structure's service life is essential for predicting its durability and response to extreme loads or harsh environmental conditions.

This contribution introduces a hygro-thermo-viscoelastic-damage model for concrete, considering it as a multiphase material comprising a solid phase (fine and coarse aggregates and cement paste), a liquid phase (liquid water), and a gaseous phase (a binary mixture of water vapor and dry air). The mathematical formulation is based on the rigorous framework provided by the Thermodynamically Constrained Averaging Theory [1]. While the model shares the same starting hypotheses and conservation equations as Gawin et al. [2], several originalities have been introduced at the constitutive level (e.g., the explicit introduction of cement hydration stoichiometry, the adoption of a hydration-dependent pressure-saturation relationship, and the viscoelastic-damage model).

After presenting the general model, applications to engineering problems such as the drying-aging of structural elements, repairs, and fire accidents will be discussed. The ongoing work involves integrating this mathematical model into the Thermohydrique formulation to make it available for Cast3M users.

References:

[1] **W. G. Gray and C. T. Miller** (2014) *Introduction to the Thermodynamically Constrained Averaging Theory for Porous Medium Systems*, Zurich: Springer, 2014.

[2] **D. Gawin, F. Pesavento, B.A. Schrefler** (2006) *Hygro-thermo-chemo-mechanical modelling of concrete at early ages and beyond. Part I: hydration and hygro-thermal phenomena. International Journal of Numerical Methods in Engineering*, vol. 67, n. 3, pp. 299-331.

Couplages multi physiques en contexte de géo-matériaux non linéaires

Pr. Alain Sellier

Université Toulouse III, LMDC

Le contexte du génie civil conduit à travailler sur des échelles de temps et d'espace très variables : Cigéo ou les infrastructures de production d'énergie électrique évoluent sur des durées séculaires avec des déformations mécaniques résultant de plusieurs facteurs : fluage, consolidation hydromécanique, séchage, déformations issues de réactions chimiques...

La compréhension de ces phénomènes physiques commence toujours par des recherches expérimentales dont les résultats sont synthétisés sous la forme de modèles numériques utilisables par des experts pour étudier les scénarii de vieillissement de ces infrastructures.

La restitution dans Cast3M, début 2023, par le LMDC, des modèles Fluendo3d, Endo3d, Inclusion3d, ainsi que de la procédure de couplage ségréguée dite de « Helmholtz », permet de diffuser la capitalisation des travaux d'une vingtaine de thèses co-financées avec des fonds publics, et aboutissant à ces 4 outils.

La présentation de ces outils se fera sous la forme d'une succession d'exemples permettant d'appréhender leurs principales fonctionnalités, ainsi que la façon dont la procédure de couplage de Helmholtz permet de les articuler avec d'autres composantes de Cast3M.

La procédure de Helmholtz permet en effet d'associer des bilans de flux à toute variable interne d'un modèle non linéaire sans pour autant avoir à créer de nouveaux éléments finis pour chaque application : elle généralise la notion de « non localité » en permettant des résolutions implicites convergées non locales, non linéaires, et dépendantes du temps lors des sous itérations de convergence mécaniques. Elle permet par conséquent de tester des couplages forts sans disposer de la formulation éléments finis adéquate.

Fluendo3d est une loi de comportement pour le béton armé réactif, couplant plasticité fluage, endommagements anisotropes, poromécanique, réactions chimiques endogènes, et présences de renforts fibrés longs ou courts.

Endo3d est une version « simplifiée », et donc plus rapide, de Fluendo3d ; sans fluage, sans réactions chimiques et sans renforts, adaptée aux géo matériaux naturels modélisables par un couplage plasticité - endommagement anisotrope.

Inclusion3d est une loi de comportement incluant un modèle mésoscopique à résolution élasto-plastique semi-analytique permettant de considérer des contrastes de vitesses de déformations à l'échelle des hétérogénéités du matériau sans recourir aux maillages mésoscopiques.

Ces trois derniers modèles ont vocation à converger à terme vers une version synthétique de Fluendo3d intégrant les atouts d'Inclusion3d, mais avec une vitesse de résolution qui devra tendre vers celle d'Endo3d.

La mise à disposition de la procédure de Helmholtz permet par exemple de faciliter les coupages hydromécaniques en présence de matériaux adoucissants dont l'objectivité de la dissipation énergétique est assurée par la procédure non-locale.

Calcul de maçonneries bloc-à-bloc avec Cast3M : implémentation de nouveaux modèles de joints

François-Léopold Pinet, Paul Nougayrede

Laboratoire GSA – ENSA Paris-Malaquais, Université PSL

À la suite de l'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris, un groupe de travail consacré à l'analyse de la stabilité des structures en maçonnerie a été constitué au sein du chantier scientifique CNRS – Notre Dame. Dans ce contexte, à l'aide du logiciel Cast3M, le laboratoire GSA a réalisé des modèles éléments finis bloc-à-bloc avec interfaces de certaines voûtes et arcs boutants de la cathédrale. Attendu que chaque pierre est modélisée, ainsi que les interfaces de joints de mortier, la qualité de la modélisation globale repose en particulier sur la pertinence du modèle de joint utilisé.

Deux modèles de joint ont d'abord été employés, ils sont présents dans Cast3M par la routine coul3.eso qui a été développée par Pierre Pégon. Le premier est un modèle de joint sec, c'est-à-dire avec une résistance en traction nulle et une cohésion égale à zéro. Il s'agit par conséquent d'un modèle élasto-plastique avec comme critère de plasticité un critère de Coulomb permettant de représenter le frottement. Le second modèle utilisé est assez similaire mis-à-part que la cohésion et la résistance en traction ont des valeurs non nulles, déterminées par des expérimentations réalisées à l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M) sur des formulations de mortier comparables ; on le nomme modèle cohésif. Lorsque le critère est dépassé en traction, le joint est considéré comme cassé, sa résistance en traction est mise à zéro ; cependant il garde sa cohésion. On peut considérer que ces deux modèles forment un encadrement du comportement réel d'un joint de mortier de la cathédrale : le modèle joint sec, par son caractère conservatif fournit une estimation défavorable alors qu'au contraire, le modèle cohésif tend à surestimer les capacités mécaniques des interfaces entre les pierres.

Afin d'approcher plus précisément le comportement réel d'un joint de mortier, Maurizio Brocato avait initié le projet de développer un modèle de joint avec endommagement. Ce travail a été mené sur la base de la routine coul3.eso et est actuellement poursuivi sous l'encadrement principal de Frédéric Dubois du Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) de l'Université de Montpellier. L'étude de coul3.eso a permis de comprendre en profondeur les logiques de la routine et a mis en exergue certaines fonctionnalités qui ne sont pas assurées par l'algorithme. L'ajout de ces fonctionnalités a conduit à la création de MC_modifié.eso, un nouveau modèle de joint élasto-plastique avec critère de plasticité de Mohr-Coulomb, rupture fragile (y compris en cisaillement) et possibilité d'ajouter de la dilatance. Un modèle plastique endommageable, JoinEndom.eso, avec un endommagement de type Mazars a été implémenté par la suite. Afin d'obtenir un endommagement qui prend mieux en compte les particularités du joint et de l'interface entre mortier et bloc de pierre, un second modèle de joint endommageable s'inspirant du modèle présent dans le logiciel LMGC90 est en cours de développement.

Pour tester la cohérence de ces modèles et comprendre les différences de comportement mécanique qu'ils sont susceptibles de générer sur des structures réelles, des simulations comparatives sont réalisées sur un arc simple, un mur et un arc boutant de Notre-Dame. Les fonctionnements asymptotiques des structures sont comparables en ce qui concerne la force maximale à la rupture, ce qui valide la cohérence des modèles. Cependant, les trajets de chargement, les répartitions des contraintes et des déplacements sont différentes ; ce qui révèle l'importance du choix du modèle de joint utilisé quant à la pertinence des résultats obtenus. Dans le cas de la modélisation du mur maçonné, les résultats numériques sont comparés à des essais en laboratoire qui ont été réalisés par I2M Bordeaux.

Simulation de poutres SCS avec défauts

Martin Debuisne

LEME (Université Paris Nanterre)

CEA Saclay, DES/ISAS/DM2S/SEMT/LM2S

Grâce à leur facilité de construction et à leurs bonnes performances vis-à-vis de leur poids, les constructions SCS (steel-concrete-steel) ont bénéficié d'une attention toujours plus importante de la part de la communauté scientifique ces dernières années. Bien que les voiles SCS soient généralement sujets à des charges gravitaires alignées avec leur sens de portée, ils peuvent aussi être soumis à des charges de cisaillement dans le plan, hors plan ainsi que de flexion, au cours de situations accidentelles telles que le séisme.

La recherche actuelle a principalement concentré ses efforts sur la conception de nouveaux connecteurs pour augmenter le degré d'action composite, ainsi que sur l'identification du nombre de connecteurs nécessaires pour obtenir un degré d'action composite complet. Cependant, peu d'études se sont concentrées sur les conséquences négatives des défauts liés à la mise en œuvre dans une structure SCS.

Des études ont cherché à créer des procédures de mesure pour détecter les défauts de surface entre les plaques d'acier et le cœur de béton. Si ces défauts peuvent effectivement agir sur le comportement global de la structure à cause de la potentialité de flambement des plaques d'acier en cas de mauvaise adhérence béton-acier, peu d'études ont clairement quantifié les risques associés avec les défauts d'interface.

En outre, les structures SCS peuvent être soumises aux mêmes types de défauts de bétonnage que dans le cas du béton armé : défauts de ségrégation, bulles d'air piégées dans la matrice, mauvaise qualité de vibration, mauvaises soudures, ... Sur un chantier traditionnel, la détection des défauts liés à la mise en place du béton est aisée, car un contrôle visuel est suffisant lors du décoffrage. Des techniques sont alors mises en place pour réparer les défauts du béton armé après constatation des défauts. Par nature, les structures SCS empêchent tout contrôle, a fortiori toute réparation est difficile voire impossible. Il est donc nécessaire de quantifier l'impact des défauts sur le comportement de la structure.

L'objectif de cette contribution est le développement d'une simulation précise du comportement d'une poutre SCS de la littérature en utilisant les éléments finis, qu'on pourra ensuite enrichir avec une modélisation de défauts liés aux matériaux de la poutre. Sa réponse (sans ajout de défauts) sera notamment comparée avec les résultats expérimentaux (courbe effort-flèche, profil de fissuration).

Pour modéliser des défauts autour des goujons, une première approche est de supprimer des goujons du maillage et de les remplacer par des volumes de béton. Cette approche représente un défaut très grave dans la poutre, car elle provoque un degré de participation nul de la part du goujon concerné, alors qu'on pourrait s'attendre à avoir seulement une réduction du degré de participation. Selon le goujon affecté, la simulation montre des changements de réponse significatifs lorsque des défauts sont inclus dans la poutre, notamment une fragilité plus importante dans le cas des goujons extrêmes, et des non-propagations de fissures dans le cas de goujons plus proche du point d'application de l'effort. On montrera notamment l'effet des hypothèses de simulation (symétries) au travers de ce cas d'étude.

Modélisation thermomécanique de la fabrication d'un tube droit en WAAM

S. Pascal⁽¹⁾, M. Garnier⁽²⁾, M. Garric⁽²⁾, J. Le Mercier^(1,2)

(1) CEA Saclay, DES/ISAS/DRMP/SRMA/LTA

(2) CETIM - Fabrication Additive Innovation & Industrialisation

Contact : serge.pascal@cea.fr

Notre travail porte sur la modélisation thermomécanique de la fabrication additive arc-fil ou WAAM (« Wire Arc Additive Manufacturing ») d'un tube droit avec le procédé de soudage GMAW (« Gas Metal Arc Welding »). Une maquette du tube a été réalisée par AFH et les six premières passes de la fabrication ont été instrumentées de thermocouples. Nous nous sommes limités à la simulation de ces six passes et avons comparé nos résultats aux mesures de température. De plus, la distorsion résiduelle de la plaque servant de support à la fabrication a été mesurée au régllet après débridage afin de confronter la simulation mécanique à l'expérience.

Le tube est fabriqué en acier G3SI1. Son diamètre est de 110 mm, pour une épaisseur de 7,3 mm ; le diamètre de la plaque support est de 200 mm, pour une épaisseur de 5 mm. La taille des éléments du maillage est de l'ordre du millimètre dans la zone de dépôt. L'apport de matière est simulé en complétant le maillage des passes par pas de 3 mm le long de la trajectoire de fabrication au cours du calcul. La discrétisation temporelle est telle qu'il y a environ 3π pas de temps calculés par pas d'apport de matière. La simulation comporte au final 6621 pas de temps.

L'analyse thermique est réalisée en transitoire non-linéaire. Les caractéristiques thermiques sont celles de l'acier G3SI1 à froid. Le modèle prend en compte les échanges thermiques par convection et rayonnement avec l'environnement. Une ventilation est mise en route à la fin de la 4^e passe pour diminuer la durée du refroidissement inter-passes. Cette ventilation est modélisée en augmentant arbitrairement le coefficient d'échange convectif afin de mieux coller à l'expérience. Enfin, un modèle d'échange thermique résistif est introduit entre la plaque support et les mors d'amarrage afin de tenir compte de la conduction thermique « imparfaite » aux points de contact de ces deux éléments.

L'analyse mécanique est chaînée à l'analyse thermique. On fait l'hypothèse de petites perturbations ; l'équilibre est ainsi vérifié dans la configuration initiale. Les caractéristiques mécaniques sont issues pour l'essentiel de la littérature. Une courbe d'écrouissage à 20 °C est construite en considérant une résistance mécanique de 500 MPa et un allongement à rupture de 20 %. Cette courbe est extrapolée à différentes températures en considérant que la résistance mécanique varie proportionnellement à celle de la limite élastique et en considérant que l'allongement à rupture reste constant. Nous avons mené l'analyse pour trois différents lois de comportement : modèle plastique parfait ou avec écrouissage linéaire cinématique ou isotrope. Enfin, deux conditions aux limites ont été étudiées pour représenter le bridage de la plaque support dans les mors d'amarrage.

La figure 1 présente la comparaison calcul-expérience de la mesure de température du thermocouple 7 situé en face supérieure de la plaque support, à 5 mm du bord extérieur du tube. On note la diminution de la durée de refroidissement à la fin de la 4^e passe, c'est-à-dire après le 4^e pic de température, du fait de la mise en route de la ventilation. Globalement, on constate un bon accord entre le calcul et la mesure. Toutefois, le refroidissement s'avère un peu plus marqué sur les courbes simulées. Cela peut être dû au fait que les caractéristiques thermiques sont relativement sommaires ; elles ne dépendent notamment pas de la

température. Cela peut aussi être dû à des effets thermiques locaux, comme le confinement de la lame d'air située sous la plaque support, entre le bâti et la plaque.

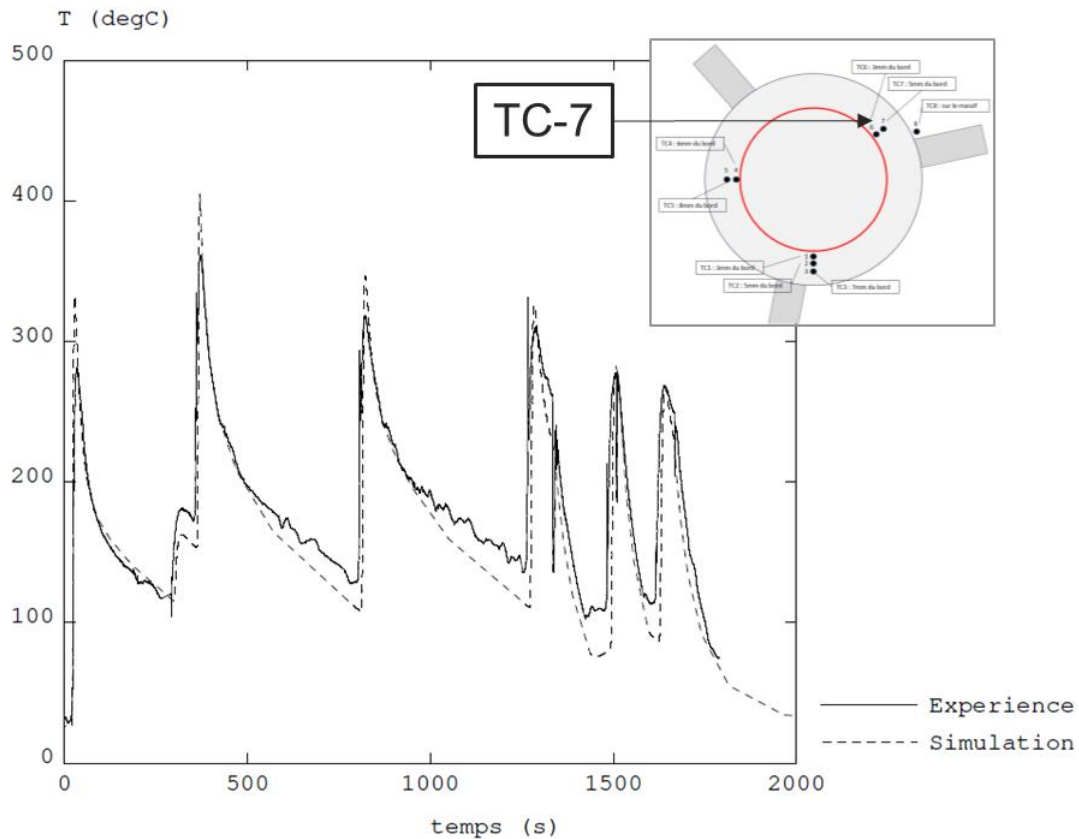


Figure 1 : comparaison calcul-expérience de la mesure de température du thermocouple 7 situé en face supérieure de la plaque support, à 5 mm du bord extérieur du tube. On note la diminution de la durée de refroidissement à la fin de la 4^e passe (4^e pic de température).

La figure 2 présente la comparaison calcul-expérience de la distorsion de la plaque support après débridage pour l'analyse menée avec un modèle plastique à écoulement cinématique linéaire. Le modèle plastique parfait conduit à des résultats similaires, alors que le modèle plastique à écoulement isotrope linéaire surestime quelque peu l'amplitude de la distorsion. Ces trois derniers résultats ont été obtenus avec des conditions aux limites maintenant la plaque support en compression dans les mors d'amarrage. Dans le cas d'un simple encastrement, la plaque support passe en traction du fait du retrait induit par la solidification du matériau d'apport au cours de la fabrication. Ce phénomène est bien observé en pratique, les mors étant resserrés régulièrement pour éviter le débridage de la pièce.

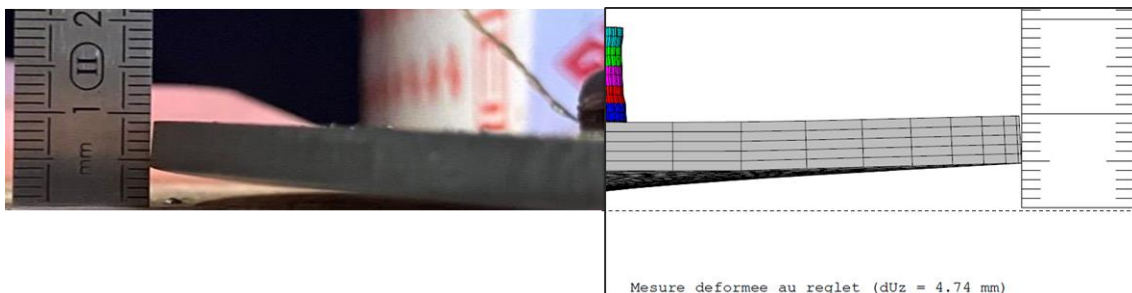


Figure 2 : comparaison calcul-expérience de la distorsion de la plaque support après débridage. Analyse menée avec un modèle plastique à écoulement cinématique linéaire.

Modélisation des bains de fusion pour le procédé de fusion sur lit de poudre

Dihya Mezi

CEA Saclay, DES/ISAS/DRMP/SRMA/LTA

La fusion laser sur lit de poudre (LPBF) est un procédé de fabrication additive (FA). Il permet de réaliser des pièces métalliques complexes sans utiliser les méthodes conventionnelles. Pendant le procédé LPBF, l'apport d'énergie du laser sur la poudre métallique engendre des cycles thermiques: fusion, vaporisation et solidification. Ces changements de phases ont une influence sur la qualité de la pièce finale : formation de porosités et rugosité de la surface. La compréhension de ces phénomènes physiques à l'échelle du bain permet optimiser les paramètres du procédé afin de réduire la formation de porosités et d'améliorer l'état de la pièce.

Dans cette étude, nous portons notre intérêt sur la compréhension de la physique de LPBF qui est complexe au vu des nombreux phénomènes locaux lors de l'interaction laser matière dans le bain de fusion. Il existe aussi plusieurs échelles qui sont à prendre en considération. Par conséquent, un modèle numérique développé sur Cast3m pour la modélisation du soudage TIG a été utilisé et adapté dans le calcul du bain de fusion pour la FA. Notre objectif est de fournir un modèle numérique pour résoudre les problèmes thermo-fluidiques liés au bain fondu pendant ce procédé. L'étude inclut également l'analyse de l'évaporation métallique et une comparaison avec les données expérimentales issus de la thèse de Baumard 2020. Enfin, nous explorons l'influence de la surface libre en tenant compte de pression de recul dans le bain de fusion.

Modélisation de la fermeture des pores aux interfaces des pièces soudées-diffusées

Maxime Huguet, Isabelle Moro, Laurent Briottet, Olivier Gillia
CEA/DRT/LITEN/DTBH/SCPC/LCA

Le soudage diffusion, ou soudage en phase solide, consiste à mettre en contact intime deux pièces métalliques, de même nature ou de natures différentes en les pressant l'une contre l'autre, et à chauffer cet assemblage. Sous l'effet de la température, des mécanismes de diffusion vont permettre d'établir des liaisons métalliques entre les deux pièces. Outre les problématiques de formation de phases plus ou moins propices à un assemblage résistant entre les deux pièces, une première étape importante est la disparition des cavités issues de la rugosité des surfaces à assembler. Ces cavités sont des faiblesses mécaniques, en même temps qu'elles freinent un phénomène bénéfique à la résistance de l'interface formée : la traversée du joint d'interface par les grains des matériaux soudés diffusés.

Ces cavités sont résorbables si l'on applique de très fortes conditions de pression et température (par exemple 1100°C, 1100 bar sur un assemblage homogène de pièces en Inox 316L). Mais ces fortes conditions entraînent des conséquences potentiellement néfastes sur l'état métallurgique global des pièces ou sur les géométries des assemblages. Le choix des conditions, et la manière de les appliquer, est donc un compromis entre une bonne interface soudée-diffusée et des propriétés géométriques et mécaniques optimales.

De nombreux modèles donnant les cinétiques de fermeture des cavités existent. Ils sont dans leur très grande majorité fondés sur une géométrie idéalisée de cavité sous forme lenticulaire. On citera le modèle de Hill et Wallach [1], qui est un des modèles les plus connus et élaborés. Une thèse récente [2] a montré les limites de ce type de modèle. Le présent travail consiste à aller chercher une information plus précise à l'échelle d'une cavité quelconque, en particulier dans les premiers instants de son évolution. Il s'agit donc de prendre en compte les phénomènes de diffusion autour d'une cavité quelconque (diffusion en surface et à l'interface) en couplage avec le champ mécanique environnant.

L'exposé s'attachera à détailler les phénomènes physiques autour de la cavité et la manière dont le problème est abordé avec Cast3M : couplage d'un modèle 2D plan d'écoulement élasto-viscoplastique au problème de diffusion le long des interfaces 1D. Les difficultés rencontrées et les hypothèses sont discutées. Une confrontation expérimentale à des cavités modèles permet de juger des apports de la modélisation.

Références :

[1] **A. Hill, E. R. Wallach**, "Modelling solid-state diffusion bonding" *Acta Metallurgica*, 1989, 37, 2425-2437.

[2] **M. Maunay**, "Echangeur de chaleur obtenu par soudage-diffusion : simulation des déformées et prédiction de la tenue mécanique des interfaces", *Thèse, Université Grenoble Alpes*, 2016.

La Méthode Hybrid High Order dans Cast3M. Description et Applications

David Siedel⁽¹⁾, Thomas Helfer⁽²⁾, Olivier Fandeur⁽³⁾

(1) Mines Paris, Université PSL, Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87, 91003, Évry, France, david.siedel@michelin.com (adresse actuelle)

(2) CEA, Département d'Études des Combustibles, 13108, Saint-Paul-lez-Durance, France, thomas.helfer@cea.fr

(3) Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Études Mécaniques et Thermiques, 91191, Gif-sur-Yvette, France, olivier.fandeur@cea.fr

La récente méthode « Hybrid High Order » (HHO) a montré tout son intérêt dans le domaine de la mécanique numérique non linéaire. En effet, cette méthode déploie un type d'élément fini (EF) robuste aux phénomènes liés au traitement de l'incompressibilité des matériaux, d'ordre arbitrairement élevé, et adapté à des maillages polyédriques quelconques. Comme pour la méthode des éléments finis dite standard, la cinématique d'un élément est décrite par des inconnues, dites primales, en déplacement. Le caractère hybride de la méthode vient du support des inconnues qui décrit le déplacement dans l'élément (ou cellule) et aussi de celui de chacune de ses faces. De plus, il est possible de montrer que cette méthode HHO dérive du principe variationnel de Hu-Washizu, principe qui généralise le principe des travaux virtuels classique, base de la méthode EF standard. Via ce cadre, la discrétisation de la méthode HHO présente alors un caractère similaire à celle des éléments finis standard, ce qui permet alors aisément son introduction dans les codes de calcul EF actuels, dont le code Cast3M. L'ensemble des propriétés de cette méthode, en particulier sa cinématique enrichie, permet alors d'exploiter de nouvelles possibilités en terme de schémas numériques, compatibles avec les exigences des simulations industrielles, parmi lesquelles nous retrouverons le traitement robuste de l'écoulement incompressible des matériaux (sans verrouillage numérique), couplé ou on à de la fissuration, ainsi que des méthodes efficaces de raffinement de maillage adaptatif.

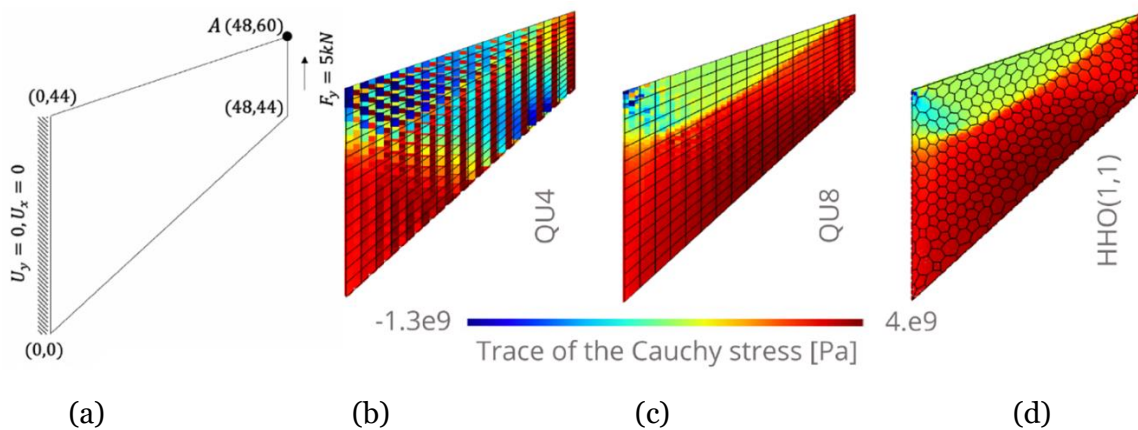


Figure 1 : Illustration sur la Membrane de Cook 2D (a) des problèmes classiques d'oscillations de la pression hydrostatique dans les cas des éléments finis standard de Lagrange linéaire à 4 nœuds (b), et quadratique à 8 nœuds, la méthode HHO avec d'éléments polygonaux quelconques (d) ne présentant pas ces oscillations. Ces oscillations, au sein d'un même élément fini, ne disparaissent pas lorsque la taille des éléments finis diminue : problème intrinsèque des EF standards.

Références :

David Siedel. *A robust numerical approach for the description of brittle fracture and viscoplastic behavior of nuclear fuel rods. Thèse de Doctorat Mines Paris PSL, soutenue le 03 mai 2023*

David Siedel, Thomas Helfer, Olivier Fandeur, Jacques Besson, Samuel Forest, Nicolas Pignet. *Schéma de résolution locale pour la méthode Hybrid High Order et application en mécanique non-linéaire. 15e colloque national en calcul des structures, CSMA 2022, hal-03717700*

Mickaël Abbas, Alexandre Ern, Nicolas Pignet. *A Hybrid High-Order method for finite elastoplastic deformations within a logarithmic strain framework. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 120(3) p. 303–327, October 2019*

```

`/shdddhy+.
.sdhs+ooshdmNh:
-mdo/--.-:+ydNNN+
dms/-...:/odmNNN-
.Nmy+---:/oydmNNN+
mmdyso+ooyhmmNNNN-
:mNmdddmNNNNNy/-`
`/ydddddmh+.
-yNNmNNNNNNdsyso+o+.`/ydhdddyy+.
:ddy///+shmNmo`
-+ydmNmho:`-+syo++yds+//oydmNmo`
/mho:-...-/oymNNy
.y/d+` `./shmy/-...:+ydNNNy
mms+...-/ohmNNN/
`s:d/ `Nds/-...-/+ydNNN:
`Nmhs+://+oydmNNN+
`s:d/ `Nmy+://oydmNNNN/
hNmhdhyssyhdmmNNNN/`
`s:d/ `dNmhyssyhdmmNNNNm.
.hNNmmmmmmNNNNNS+/-`
`y/m/ `.-:+mNmmmmmmmNNNNNm:
`+hmNNNNNNNNds:oyyo+++` :osohh+` .-://+sys/sdNNNNNNNNds.
`-+syyyso:. `+sssoos+ohyo/ohyys//oyyo-` .++mhsyyys+:.
.ods-.:odms--/ymmy/. `++dy`
`ms+ooymmyosydNN/ -/+ds`
smy:.+h:-+hNNd` :/+do
`-:dh+/hh+/+ydNNo+/.`/:od+
`-+syyyso:. `.-://oyhdmmmmmmmmNNmhsso+oom/ `-+syyyso:.
`+hdysoosydms://+sys/. ./sydsms+- .:sysoos+/+hsoosshmNds.
.hmy/:-.-:/shmNmooyo:` `s/d/ .:/dhsysddo/----/oydNNm:
hnh+...-:oymNNN/` `y/d/ -/:hy` .mms/-...-:+ydNNm.
`Nmho/:-.-:/+ydmmNN+ `y/d/ -:/hs` .Nms+:-.-:/+shdNNNN/
mNmhysoosyhdmmNNNN/ `s/d/ ::/d+ `NmdysoosyhdmmNNNN-
/mNmdddmNNNNNh+:` .y+d+`/:od/ `:-:oNNmdddmNNNNNS
:dmNNNNNNNNNmhyss+++/-` -+yhdhdddyyd-`.:://oyhdNNNNNNNNNNm+
`s:dmmmmmmy+. `oysoo+oydy+//+shmNmo:/+shs/. `/sdmmmmmy+.
`-+yhmh+:-.-:/shmNNhho:`
mmy+:-.-:+shmNNN-
.Nmho+///oshdmNNN+
dNmhdhyssyhdmmNNNN-
-mNNmmmmmmNNNNNN+
.smNNNNNNNNNNh-
`/shdddhs+.

```