

Contact DM2S : juliette.cahen@cea.fr

Estimateurs d'erreur a posteriori pour la simulation de problèmes de diffusion et de mécanique des fluides

pascal.omnes@cea.fr

L'une des techniques modernes pour optimiser les ressources informatiques utilisées lors de la simulation numérique d'un phénomène physique est le raffinement adaptatif de maillage, fondé sur des estimateurs a posteriori de l'erreur commise. Ces estimateurs permettent de déterminer les zones du maillage devant être raffinées en priorité; ils permettent également à l'utilisateur de garantir que le calcul effectué approche la solution du problème continu à une certaine tolérance près.

Le Service Fluides Numériques, Modélisation et Études (DM2S/SFME) développe et utilise des méthodes de volumes finis pour résoudre des équations elliptiques modélisant des phénomènes de diffusion ou pour résoudre des équations liées à la mécanique des fluides (écoulements en milieux poreux, écoulements diphasiques homogénéisés, simulation numérique directe de bulles de vapeur dans l'eau).

Ces applications sont coûteuses en ressources informatiques et le développement d'estimateurs a posteriori en vue du raffinement adaptatif des maillages permettra de diminuer ces coûts pour une précision donnée, ou d'augmenter la précision des calculs à coût fixé.

Le travail de thèse s'effectuera avec l'objectif de développer des outils communs à l'ensemble de ces applications.

Les estimateurs a posteriori pour les méthodes de volumes finis pour les équations de diffusion ou les équations de Stokes sont très peu développés; ce sujet présente donc un fort intérêt sur le plan académique et répond également aux recommandations du comité scientifique ayant évalué les activités de la DEN fin 2003.

Modélisation et simulation numérique d'écoulements multi-composants en milieu poreux

florian.caro@cea.fr

Le sujet de thèse proposé concerne la modélisation et la simulation numérique d'écoulements multi-composants en milieu poreux. En ce qui concerne la modélisation, nous proposons de réfléchir sur le modèle couramment utilisé dans la littérature et particulièrement aux hypothèses physiques sous-jacentes. Des réflexions seront également faites sur un choix judicieux du jeu de variables afin d'avoir un problème bien posé d'un point de vue mathématique et possédant de bonnes propriétés (dégénérescence du modèle lorsque le milieu est saturé par exemple). D'un point de vue numérique, la méthode choisie devra être capable de capturer les zones saturées et non-saturées. Afin de valider les résultats numériques obtenus, des solutions analytiques ou pseudo-analytiques seront exhibées en effectuant les simplifications nécessaires. Par la suite, nous proposons d'étendre les résultats obtenus à des géométries plus complexes 3D en utilisant un environnement de calcul parallèle.

Simulation de la combustion d'hydrogène à grande échelle

donna.calhoun@cea.fr

Dans le cadre de l'évaluation du risque hydrogène dans une enceinte de réacteur nucléaire ou lorsque l'hydrogène est utilisé comme vecteur énergétique, la compréhension de la distribution et de la combustion éventuelle d'hydrogène est nécessaire pour évaluer les conséquences d'un accident sur les personnes ou les équipements.

L'objet de cette thèse est de mettre en place une méthodologie de modélisation et de simulation de la déflagration d'hydrogène à l'échelle d'un bâtiment. Les modèles existants

seront étudiés et leur adaptation aux grandes échelles sera étudiée.

Dans une seconde partie, on s'intéressera au développement de schémas numériques efficaces en 3D aux échelles considérées pour traiter ces déflagrations. L'implémentation se fera dans un code massivement parallèle doté de fonctionnalités d'adaptation de maillage.

La dernière partie de cette thèse sera consacrée à la validation des modèles et schémas sur des expériences de combustion à grande échelles.

Schéma multi-échelle appliqué aux transitions de régimes d'écoulement diphasique

anela.kumbaro@cea.fr

Le but du sujet proposé est de mettre au point une méthode de type asymptotique multi-échelle pouvant être utilisée dans la simulation des écoulements diphasiques dans des cas tels que :

- disparition ou apparition d'une phase,
- transitions entre les différents régimes.

Au fait, le laboratoire LETR a pour objectif le développement fin 2008 d'une première version d'un code de thermohydraulique aux échelles locales et poreuses pour les applications coeur, bâti sur le code OVAP [1],[2], sur le retour d'expérience FLICA-4, et sur l'expression des besoins de différents projets (NEPTUNE, PN, RJH, etc.) avec une modélisation bifluide à 6 équations et multichamps, et intégrant les potentialités du code FLICA-4.

Durant la simulation d'un écoulement diphasique on peut rencontrer toute la gamme de régime d'écoulements, du monophasique liquide au monophasique gaz, en passant par différents régimes d'écoulement diphasique, par exemple de l'écoulement dispersé à bulles à l'écoulement dispersé à gouttelettes. Qui plus est, la simulation de l'ensemble des régimes d'écoulement nécessite l'utilisation de lois de fermeture appropriées à chacun de ces régimes (à bulles, à poches, déstructurés, annulaires, à gouttes, stratifiés, ou autre.). Une phase (cas du modèle bifluide) ou certains champs (cas du modèle multichamps) peuvent être amenés à apparaître ou disparaître lors d'un calcul.

Au coeur du code OVAP on trouve les solveurs approchés de Riemann [1]-[4] qui surpassent par leur précision et leur aptitude à simuler des écoulements dans des géométries complexes, les méthodes traditionnelles utilisées par les codes industriels de la thermo-hydraulique diphasique. Néanmoins, certaines difficultés subsistent. Notamment, on remarque encore la présence des instabilités lors de l'apparition ou de la disparition d'une phase ou d'un champ qui nécessitent un travail de recherche supplémentaire.

On propose, dans le cadre de cette thèse de mettre au point une méthode de type multi-échelle permettant le calcul des transitions entre les différents régimes. On envisagera pour cela deux approches:

- la 1ère consiste à la conception d'une méthode asymptotiquement stable et préservatrice, permettant de calculer avec le modèle le plus fin (le modèle ayant le plus de phases ou le plus de champs) y compris dans les zones de disparition d'une phase, sans écroulement des contraintes de stabilité temporelles et spatiales. Ce type de méthode est basé sur une observation fine du modèle et de sa limite singulière lorsque le paramètre pilotant la transition tend vers zéro. Cela permet la conception d'un schéma qui respecte la même structure que le modèle continu et qui converge vers un schéma pour le modèle limite lorsque le même paramètre tend vers zéro dans la discrétisation. Cette méthode a été développée avec succès dans le contexte des plasmas pour la limite quasineutre [8].

- Une 2ème approche consiste à la définition d'une méthode de raffinement local de modèle basée sur une approche multi-échelle. Il s'agit de définir une zone de transition entre les deux modèles qui permet de gérer continûment le passage d'un modèle à l'autre. La transition est pilotée par une fonction cut-off qui peut elle-même évoluer en temps et en espace en fonction de critères d'apparition ou de disparition de phases prescrits sur des bases physiques. Là encore, cette méthode a été appliquée avec succès à la transition cinétique-fluide [9,10,11].

Cette approche permettra par exemple la modélisation de l'écoulement monophasique par un modèle bifluide à 6 équations en proposant un traitement asymptotique des singularités associées aux valeurs de taux de vide 0 et 1. Cette méthode peut être aussi utilisée pour faire un "zoom" dans un calcul code composant modèle bifluide et réalisation localement d'un calcul avec un modèle diphasique multichamps.

On doit aussi réfléchir aux modifications éventuelles à faire afin de pouvoir traiter les écoulements diphasiques à faible nombre de Mach, lorsque l'écoulement tend à devenir purement liquide, avec une vitesse du son devenant très grande devant la vitesse de l'écoulement. Un traitement approprié des termes de dissipation numérique peut permettre d'améliorer de façon très sensible la précision et la robustesse du schéma [5],[6].

En complément, le choix de variables physiques comme variables de calcul au lieu des variables conservatives, peut permettre d'améliorer la performance des schémas et augmenter la robustesse du calcul dans le cas d'apparition/disparition de phase/champ. Des travaux [7] ont en effet montré que lorsqu'un fluide monophasique obéissait à des lois d'état générales, souvent données sous forme de tables, le choix des variables physiques ou thermodynamiques comme variables de calcul au lieu des variables conservatives, conduisait à une amélioration de la performance des schémas. Il en est de même pour la simulation des écoulements diphasiques, pour laquelle l'appel aux lois d'état représente une part très importante du coût du calcul.

[1] Kumbaro, A., Seignole V., "Two-Phase Flow Computing with OVAP Code", Workshop Trends in Numerical and Physical Modeling of Industrial Two-phase Flow, Cargse, France, September 26-28, 2001.

[2] A. Kumbaro, M. Podowski, "The Effect of Bubble/Bubble Interactions on Local Void Distribution in Two-Phase Flows", 13th IHT Conference, 13-18 August, Sydney, Australia, 2006

[3] Toumi and A. Kumbaro, "An Approximate Linearized Riemann Solver for a Two-Fluid Model", J. Comput. Phys., 124, 286-300, 1996.

[4] H. Staedtke, et al., The ASTAR Project - Status and Perspective, 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10), Seoul, Korea, October 5-9, 2003

[5] E. Turkel, "Review of Preconditioning Methods for Fluid Dynamics", App. Num. Meth., 12, 257-284, 1993.

[6] H. Paillre, C. Viozat, A. Kumbaro and I. Toumi, "Comparison of Low Mach Number Models for Natural Convection Problems", Proc. EURO THERM Seminar No. 63, 'Single and Two-Phase Natural Circulation', submitted to Heat and Mass Transfer Journal, 1999.

[7] C.L. Merkle, J. Sullivan, P. Buelow and S. Venkateswaran, "Computations of Fbws with Arbitrary Equations of State", AIAA J., Vol. 36, 4, 515-521, 1998

[8] P. Crispel, P. Degond, M-H. Vignal, An asymptotic preserving scheme for the two-fluid Euler-Poisson model in the quasineutral limit, J. Comput. Phys., sous presse.

[9] P. Degond, S. Jin, A smooth transition model between kinetic and diffusion equations, SIAM Numerical Analysis, 42 (2005), pp. 2671-2687.

[10] P. Degond, L. Mieussens, S. Jin, A smooth transition model between kinetic and hydrodynamic equations, J. Comput. Phys., 209 (2005), pp. 665-694 .

[11] P. Degond, J-G. Liu, L. Mieussens, Macroscopic fluid models with localized kinetic upscaling effects, SIAM J. Multiscale Modeling and Simulation, à paraître.

Modélisation et simulation numérique d'écoulement bas Mach multi-espèces pour le calcul de distribution d'hydrogène

gilles.bernard-michel@cea.fr

La compréhension des mécanismes de distribution de l'hydrogène dans des enceintes confinées est essentielle à la démarche de sûreté, que ce soit dans le cadre des nouvelles

technologies pour l'énergie (piles à combustibles stationnaires ou pour le transport) ou dans le cadre de l'industrie électro-nucléaire (accidents graves de réacteurs à eau).

Le premier axe de la thèse consistera à exploiter les expériences en cours au laboratoire (GAMELAN, GARAGE), éventuellement à en définir de nouvelles, afin de se doter d'une base de cas de validation physique.

Le deuxième axe de la thèse portera sur la modélisation numérique :

- sur le plan de la phénoménologie en développant des modèles bas Mach multi-espèces ;
- au niveau des performances numériques, en s'intéressant aux méthodes de projection, aux techniques d'accélération de convergence et à l'utilisation de solveurs itératifs performants (amélioration des préconditionneurs, parallélisme).

L'objectif final est de valider les modèles sur les résultats expérimentaux pour des volumes allant de quelques m³ (expériences analytiques) à plusieurs centaines de m³ (expériences à grande échelle).

Un tiers de la thèse sera consacré à la bibliographie et à la rédaction, un tiers de la thèse à la modélisation numérique et le dernier tiers à la conduite de la validation et à l'exploitation des expériences.

Il serait bénéfique de démarrer le sujet avec un stage de DEA.

Pour l'aspect expérimental, l'étudiant disposera de l'appui de la plate-forme expérimentale du SFME et pour l'aspect numérique d'un environnement scientifique motivant et des moyens de calcul du CCRT.

Schéma volumes finis pour des opérateurs de diffusion anisotropes hétérogènes sur des maillages non-conformes

christophe.le-potier@cea.fr

La simulation d'écoulements dans les milieux poreux et le transport de traceurs demande de disposer de méthodes numériques précises et robustes prenant en compte des opérateurs de diffusion anisotropes hétérogènes. Les approches opérationnelles au CEA (méthode des éléments finis mixtes hybrides, volumes finis) ont montré leur efficacité. Cependant, dans certaines modélisations, il peut être utile d'améliorer localement la précision des solutions à l'aide d'un estimateur d'erreur. Un des choix du laboratoire MTMS (Modélisation des transferts en milieux solides), qui présente l'avantage de ne pas remailler tout le domaine de calcul, est d'effectuer une adaptation de maillage, très rapide algorithmiquement, mais qui fait apparaître des mailles non conformes.

Nous nous intéressons à une extension de la méthode volumes finis dite du "Diamant". Elle repose sur une discrétisation centrée sur les mailles et s'appuie sur la reconstruction de la solution aux noeuds du maillage, en général par une méthode de moindre carré. Il s'agit de généraliser ce schéma à des maillages non conformes les plus généraux possibles et à des tenseurs hétérogènes anisotropes.

En ce qui concerne la coercivité du schéma, des propriétés de convergence ont été établies sous hypothèses géométriques. Il sera important de relaxer cette contrainte de manière à traiter des maillages très déformés et des tenseurs fortement anisotropes.

L'objectif final est de traiter des cas classiques de la communauté, définis par l'Andra.

Modélisation de la Dispersion et du Transport Anormal en Milieu Poreux Insaturé

alain.cartalade@cea.fr

La modélisation du transport de soluté en milieu poreux insaturé (sol, aquifère, ...) présente deux difficultés principales. La première est liée à la dispersion hydrodynamique, phénomène de mélange qui traduit l'étalement du traceur au fur et à mesure de son évolution dans le milieu poreux. Ce phénomène se traduit formellement par un coefficient contenant des informations sur la structure du milieu (tortuosité), les propriétés du traceur (diffusion

moléculaire), les champs des vitesses du fluide et ses fluctuations. Ce coefficient est relativement bien connu dans le cas où le milieu est totalement saturé en eau mais beaucoup moins dans le contexte du transport multi-phases et multi-constituants, en particulier en milieu insaturé. La seconde difficulté, reliée à la première, est relative aux formes des courbes de concentration qui présentent des dissymétries dans le cas insaturé. Et surtout, elles ne sont pas reproductibles en appliquant un bilan de masse associé à une simple loi de Fick pour l'expression du flux. On propose dans ce sujet de thèse d'améliorer la modélisation de ces deux aspects du transport, en adoptant une approche originale basée sur une variante fractionnaire de la loi de Fick. Ceci permettra en particulier de reproduire les comportements "anormaux" du traceur et d'unifier une partie des approches de modélisation existantes en relation avec une représentation microscopique du phénomène étudié. On proposera tout d'abord un modèle de transport tenant compte d'une phase air à l'échelle microscopique. L'équation aux dérivées partielles fractionnaires sera obtenue en effectuant un passage à la limite qui devrait permettre la mise en évidence des relations entre les paramètres classiques des équations de transport (dispersion) et la teneur en eau du milieu poreux. L'application et la validation des prédictions d'un tel modèle seront réalisées à l'aide du dispositif expérimental Beeti du CEA composé d'une colonne et d'un système de mesures dichromatiques sur lequel des expériences sont actuellement en cours.

Conception de schémas de type « Linéaire Surfactive » d'ordre supérieur basées sur la méthode des caractéristiques pour la résolution de l'équation du transport des neutrons.

simone.santandrea@cea.fr

Le but de cette thèse est d'améliorer un schéma numérique pour la résolution de l'équation du transport des neutrons dans des maillages non structurés. A cette fin, on se propose de réviser le schéma dit « linéaire surfactive » qui a été récemment développé au CEA. Dans ce schéma les quantités volumiques d'intérêt (tel que les flux ou les sources de collision neutroniques) sont interpolées à partir de quantités surfactives. Pour l'instant l'approximation surfactive n'est que constante par morceaux. Ici l'on propose de prendre en compte de bases locales adaptées à la forme de chaque surface (généralement de segments ou de cercles/arcs de cercle) pour réduire le nombre d'inconnus et augmenter la précision du calcul. Les problématiques liées à la question de l'accélération seront à traiter soigneusement dans le travail de thèse.

Physique et modélisation d'une excursion accidentelle de criticité dans un milieu fissile aqueux

veronique.massé@cea.fr

Le travail de thèse proposé consiste à modéliser de manière approfondie, sur le plan de la physique et de la neutronique, l'ensemble des phénomènes qui concourent à la description du comportement d'une solution fissile homogène soumise à une excursion en chaîne de fissions, encore appelé « excursion » accidentelle de criticité.

Etude et développement de nouvelles méthodes de qualification de codes de calcul dans les études de criticité

emmanuel.gagnier@cea.fr

Les études de sûreté-criticité ont pour objectif d'évaluer, pour mieux s'en prévenir, le risque de criticité associé à des installations nucléaires manipulant de la matière fissile. Pour cela des calculs de criticité modélisant, dans des configurations plus ou moins réalistes, le système à évaluer dans des codes de calcul, sont réalisés. Afin de s'assurer de la validité des calculs, ces codes nécessitent d'être qualifiés.

On appelle « qualification », le processus mis en œuvre pour comparer les résultats des calculs aux résultats expérimentaux, interpréter et comprendre l'origine des écarts, et éventuellement transposer ces écarts à l'ensemble des situations réelles à étudier.

Une des difficultés du processus de qualification est d'établir clairement une correspondance entre les calculs réalisés dans un cadre industriels et les expériences de qualification. En effet, de nombreux paramètres entrent en jeu comme par exemple la nature du milieu fissile, les caractéristiques matériaux des réflecteurs ou le profil du spectre neutronique.

Le travail de thèse proposé consiste à étudier et développer une méthode permettant d'améliorer la sélection des expériences retenues pour la qualification d'un calcul et d'obtenir ainsi une estimation plus précise du biais calcul/expérience résultant. L'étudiant devra en particulier analyser le retour d'expérience existant dans d'autre domaine scientifique et s'appuyer sur des compétences fortes en mathématiques et statistiques. En particulier, les développements des méthodes de calculs et d'analyse d'incertitudes doivent amener à profiter des compétences transverses du CEA.

Le plan du travail prévu est le suivant :

- Analyse des méthodes existantes comme celles des systèmes TSUNAMI de l'ORNL et CAD basées sur les analyses de sensibilité, du système MACSENS de l'IRSN basée sur l'Analyse en Composantes Principales ou des systèmes TSURFER (ORNL) et INDEC (IPPE) basée sur les modèles linéaires généralisés.
- Etude de méthodologies équivalentes dans d'autres domaines scientifiques, en particulier les analyses d'incertitudes, de sensibilité globale, de plans d'expériences et d'apprentissage statistique
- Etude comparative et développement d'une ou plusieurs méthodologies
- Réalisation d'un prototype et tests de validation, à partir de la base de qualification du code TRIPOLI-4 et des études menées par CP2C avec TRIPOLI-4

Les enjeux scientifiques de la thèse sont :

- de disposer de méthodes et d'outils permettant d'estimer de manière rapide et fiable les biais liés à la qualification des codes de calculs à prendre en compte dans les études de criticité.
- d'identifier les besoins expérimentaux pour les domaines peu ou mal qualifiés ou, a contrario, de justifier de qualification sur des domaines a priori mal couvert,
- de définir les besoins expérimentaux pour la qualification des combustibles GEN IV,
- d'établir une application « industrielle » de méthodologies innovantes développées au CEA.

Enfin, le travail de thèse proposé s'inscrit dans le cadre de l'évolution des pratiques dans le domaine des études de sûreté-criticité. En effet, les modélisations et les calculs réalisés décrivent de plus en plus précisément les équipements induisant une exigence de qualité de plus en plus forte sur les codes de calculs. Les études de qualification sont le point clé pour démontrer la qualité des codes de calculs et deviennent donc un enjeu majeur au fil du temps pour les études de sûreté. Ces exigences vont notamment s'accroître avec les perspectives sur le dimensionnement des usines du futur mettant en œuvre de nouveaux combustibles pour lesquels la qualification des codes de calculs sera à démontrer.

Rupture et dimensionnement des structures en matériau à faible ductilité

stéphane.chapuliot@cea.fr

L'objet de cette thèse est de constituer des bases théoriques solides pour les futures règles et critères de dimensionnement des structures constituées de matériau à faible ductilité. Elle se focalisera sur deux aspects :

- La compréhension des mécanismes d'amorçage et de propagation des fissures, avec ou sans défaut initial : rupture purement fragile ou rupture à très faible ténacité.
- La transposabilité des observations des éprouvettes de laboratoire aux structures, des

chargements mécaniques aux chargements thermiques : même mécanisme ? Paramètres critiques pertinents ? Critères ?

Pour ce faire, la thèse devra constituer un support expérimental, dédié aussi bien à la compréhension des phénomènes qu'à la validation des hypothèses. En parallèle, ces essais seront accompagnés de modélisations numériques fines par la méthode des éléments finis, afin de déterminer de façon précise les conditions à rupture.

Mesure et modélisation des contraintes résiduelles lors du soudage hétérogène de structures tubulaires épaisses

danielle.ayrault@cea.fr

Les soudures bimétalliques des circuits primaires dans les réacteurs à eau sous pression (REP) sont détensionnées après assemblage mais imparfaitement compte tenu des fortes épaisseurs des composants et présentent ainsi des niveaux de contraintes résiduelles qui, associés à un environnement REP et à des microstructures particulières, peuvent être à l'origine d'un endommagement par corrosion sous contrainte. Les contraintes résiduelles résultant de l'opération d'assemblage constituent par ailleurs un chargement mécanique supplémentaire qui doit être pris en compte dans les critères d'analyse établis dans le cadre de l'intégrité de ces structures.

Le sujet proposé pour la thèse s'inscrit au sein de cette problématique avec pour objectif la détermination des contraintes résiduelles dans la structure générées lors de l'opération de soudage. On s'appuiera sur une approche couplée expérimentale / numérique.

La démarche mise en œuvre comportera les principales étapes suivantes :

- définition d'une configuration représentative de la fabrication (en termes de matériaux, géométrie, conditions opératoires de soudage, ...),
- réalisation de maquettes de soudage instrumentées,
- caractérisation métallurgique et mécanique des différentes zones de la liaison hétérogène,
- définition de la méthode de mesure des contraintes résiduelles et d'une stratégie de caractérisation des maquettes de soudage,
- réalisation des mesures de contraintes résiduelles,
- mise en place de la simulation numérique du soudage pour le calcul des contraintes résiduelles,
- validation, pour les points de mesure, des calculs en confrontation avec l'expérience,
- calcul du champ de contraintes résiduelles dans la zone d'assemblage pour fournir des données d'entrée à des analyses ultérieures de comportement de ces assemblages au regard du phénomène de corrosion sous contrainte et de propagation de fissure sous chargement mécanique.

Pour ce faire, on utilisera le savoir faire du laboratoire LTA concernant la faisabilité des assemblages hétérogènes (disponibilité des moyens de soudage, mise en œuvre des modes opératoires de soudage, ...).

Concernant l'identification du modèle d'apport de chaleur en soudage, point d'entrée des calculs thermomécaniques, on s'appuiera sur l'expertise du laboratoire LTA qui a déjà mis en œuvre une démarche permettant d'estimer les paramètres du modèle thermique par méthode inverse de manière pertinente à l'aide d'essais de soudage instrumentés thermiquement en couplage avec la modélisation thermique.

Les mesures de contraintes résiduelles seront réalisées par des spécialistes de l'Université Technologique de Troyes et éventuellement par d'autres partenaires.

D'une manière générale, les travaux de la thèse seront réalisés en collaboration avec d'autres équipes du CEA, en particulier des spécialistes de la corrosion sous contrainte et de la mécanique de la rupture.

Etude de la fissuration multiple en fatigue thermique (faïençage thermique)

antoine.fissolo@cea.fr

Etude de la fissuration multiple en fatigue thermique (faïençage thermique)

De nombreux composants de circuits de réacteurs nucléaires sont soumis de façon soit potentielle, soit avérée, à de la fatigue thermique. C'est une fissuration de fatigue thermique qui a ainsi été à l'origine de la fuite sur le circuit RRA (*) de Civaux I en Mai 1998. Les expertises ont montré que l'endommagement se présentait sous forme de fissures profondes au niveau des cordons de soudure et sous forme de réseau de fissures plutôt peu profondes pour les zones exemptes de singularités. On évoque, dans ce dernier cas, le terme de faïençage thermique. Bien que cet endommagement ne soit pas apparu pour l'instant comme critique, la question de la constitution et de la stabilité de ces réseaux est posée. Les fissures d'un réseau de faïençage thermique peuvent-elles s'arrêter ? Cette action s'inscrit dans le cadre des exigences de sûreté requises pour les installations nucléaires.

D'une façon générale, le CEA a engagé un vaste programme pour correctement appréhender la fatigue thermique à grand nombre de cycles. En ce qui concerne la fissuration, une base expérimentale importante a été obtenue sur les dispositifs de fatigue thermique construits au CEA, depuis une quinzaine d'années. On a, en particulier, reproduit sur éprouvettes des réseaux de fissures semblables à ceux observés sur certains composants. Les caractéristiques morphologiques de ces réseaux ont été déterminées à partir d'observations superficielles, puis en profondeur par une abrasion contrôlée « couche par couche ». Il a été établi que le développement de fissures parallèles en profondeur conduit à un retard significatif à la propagation : ce comportement est qualifié d' « effet d'écran ». Ensuite, une fissure dominante émerge et tendrait à se propager comme une fissure isolée.

Un des objectifs actuels de la fatigue thermique est la mise en place d'un modèle pour estimer l'évolution des caractéristiques morphologiques des réseaux de faïençage (pas du réseau, profondeurs des fissures,...) en fonction du chargement thermique. On cherche en particulier à connaître les conditions d'émergence d'une fissure dominante. Un premier travail de simulation de la fissuration multiple en profondeur a été réalisé par des calculs aux éléments finis en 2D. Cette modélisation repose sur une approche simplifiée issue de la mécanique de la rupture, prenant en compte la plasticité et la fermeture de fissure. Toutefois, l'estimation de l' « effet d'écran » peut ne pas être suffisante, une fissure pouvant finir par émerger du réseau. De ce fait, un enjeu important est aussi l'estimation des conditions d'arrêt de la propagation.

Le travail de Thèse proposé comprendra deux volets :

§ 1 - Un volet simulation portera sur la modélisation de la fissuration multiple sous chargement thermique et des conditions d'émergence d'une fissure dominante dans un réseau. Les calculs seront réalisés par la méthode des éléments finis. Le travail de modélisation élasto-plastique sera mené à son terme. Dans ce cadre, l'aspect fissures courtes sera pris en compte. Il est établi que la propagation des fissures courtes, dont la taille atteint quelques grains, ne peut être correctement décrite par les lois usuelles (en DK ou DJ). Un autre axe portera sur une meilleure prise en compte de l'amorçage, en intégrant une loi d'amorçage plus "physique", c'est à dire prenant en compte la taille de grain et l'orientation cristalline. Celle-ci sera issue des travaux sur l'amorçage à l'échelle du grain (approche mésoscopique) réalisés par les métallurgistes. Des contacts réguliers avec cette équipe seront donc nécessaires. Le travail de simulation sera aussi entrepris pour des chargements représentatifs des conditions rencontrées en service. Dans ce cadre, on cherchera aussi à se rapprocher de l'équipe qui estime les chargements thermiques.

§ 2 - Un volet expérimental et numérique portera sur la détermination des conditions d'arrêt de la propagation pour des chargements suffisamment représentatifs de ceux rencontrés sur les éprouvettes et en service. On s'intéressera à une fissure unique considérée comme représentative d'une fissure émergente. Ce travail nécessitera de définir les

éprouvettes et les chargements les plus adaptés. Ce travail sera complété par une modélisation numérique de la fermeture, afin d'assurer la transposition à la fatigue thermique.

(*) Circuit de Refroidissement du Réacteur à l'Arrêt : Dissipe l'énergie résiduelle du réacteur à l'arrêt.

Endommagement en fatigue biaxiale, application à la fatigue thermique

cedric.gourdin@cea.fr

Les conditions de fonctionnement des installations industrielles soumettent les matériaux de structure à une grande variété de sollicitations d'origine mécanique et thermique. Ces sollicitations peuvent être induites par des gradients thermiques importants variant au cours du temps dans une section du composant. Ces chargements ont bien souvent un caractère cyclique. De nombreux composants de circuits de réacteurs nucléaires (en France mais également dans le Monde) sont soumis de façon soit potentielle, soit avérée, à de la fatigue thermique sans que l'on sache apprécier leur durée de vie. Un endommagement de fatigue thermique a d'abord été observé dans les réacteurs à neutrons rapides (RNR), puis dans certains composants des réacteurs à eau pressurisée (REP), comme les boucles RRA (*) et les circuits RIS (**).

Enjeux :

Plus précisément, c'est une fissuration de fatigue thermique qui a ainsi été à l'origine de la fuite sur le circuit RRA de Civaux I en Mai 1998. Les expertises ont montré que l'endommagement se présentait à la fois sous forme de fissures profondes au niveau des cordons de soudure et sous forme de réseau de fissures dans les zones exemptes de singularités (parties droites).

La mise en place d'une approche multi-disciplinaire s'est ainsi avérée indispensable pour correctement appréhender la fatigue thermique à grand nombre de cycles. Cette approche pluridisciplinaire comprend :

La thermohydraulique, responsable de la sollicitation.

La mécanique, réponse de la structure à la sollicitation thermique.

La résistance du matériau à la sollicitation mécanique.

Cette approche a permis d'apporter des éléments de compréhension sur l'existence de chargements thermiques pouvant conduire à des fissurations conséquentes sur le circuit CIVAUX. Si la détermination des chargements thermiques via des simulations thermohydrauliques ad'hoc est importante. Il apparaît que la tenue en fatigue des matériaux soumis à des chargements thermiques fluctuant est inférieure à la tenue en fatigue purement uniaxiale. Une des principales hypothèses de cette différence vient de la non prise en compte du caractère mécanique biaxial résultant du chargement thermique.

Sans remettre en question les courbes de fatigue uniaxiales utilisées dans les codes de conception, l'utilisation de formulation équivalente (critère de Von Mises, Tresca par exemple) est inadéquate pour traiter la fatigue thermique. La mise en place de formulations adaptées à la fatigue thermique est l'objectif des travaux entrepris par le CEA.

Simulation prédictive du soudage à l'arc avec apport de matière

olivier.asserin@cea.fr

L'objectif de cette thèse est d'aboutir à un modèle prédictif 3D permettant de traiter l'apport de matière en soudage à l'arc (TIG et MIG/MAG)

Le soudage est une opération délicate à maîtriser surtout sur structure. D'abord il faut sélectionner un procédé, assurer la soudabilité ensuite il faut minimiser les déformations et les contraintes résiduelles engendrées par l'opération de soudage.

La modélisation des contraintes résiduelles induites par l'opération de soudage de façon

moindre pour les déformations est aujourd'hui suffisamment maîtrisée pour être exploitée au travers de simulations par l'industrie, et ce même dans le cas de structures complexes. Il est toutefois admis que la pertinence des résultats obtenus dépend fortement des conditions aux limites imposées au calcul structure et en particulier du modèle de chargement thermique.

Les industriels mettant en œuvre les procédés de soudage et/ou utilisant ou développant les outils de simulation numérique sont unanimes : ils souhaitent pouvoir simuler de manière prédictive l'opération de soudage (= modèle dont les paramètres dépendent des conditions opératoires du procédé tels que utilisé par le soudeur (tension, intensité, vitesse d'avance, vitesse de fil...) qui soit non seulement pertinent pour le calcul de structure mais aussi pour la soudabilité), et ce avec un outil logiciel utilisable par des techniciens.

La simulation de la partie aval (contraintes résiduelles distorsions) est aujourd'hui suffisamment maîtrisée, tandis que la modélisation et la simulation de la partie amont le procédé=(chargement thermique de la structure) commencent à émerger.

Le modèle de chargement thermique peut être obtenu de manière empirique par l'approche dite « de la source de chaleur équivalente » qui est une fonction spatio-temporelle dont les paramètres (qui sont non-physiques) sont identifiés par méthode inverse à partir d'une ou plusieurs expérience(s) de soudage instrumentée avec des thermocouples. Cependant, cette démarche ne peut s'appliquer concrètement dans un contexte industriel. En effet, l'industriel est au plus disposé à réaliser une macrographie (coupe transversale du joint de soudure permettant d'évaluer les dimensions du cordon (largeur, pénétration)).

Concernant les procédés de soudage à l'arc que sont le TIG (Tungsten Inert Gas) et le MIG/MAG (Metal Inert/Active Gas) le bain de soudage est issu de l'énergie apportée par un arc électrique, sous un environnement gazeux, crée entre l'électrode et la pièce à souder. Pour le procédé de soudage à l'arc TIG qui est le procédé de référence dans le nucléaire l'apport de matière se fait via une baguette métallique ou une bobine de fil, placée sous l'électrode, et fondant directement dans le bain de soudage.

Pour le procédé de soudage à l'arc MIG/MAG apparaissant comme un procédé utilisable dans l'avenir pour le secteur nucléaire et particulièrement utilisé dans les secteurs de la chaudronnerie légère, des structures mécano-soudés, pipelines et automobile l'arc est établi entre l'électrode fusible et la pièce sous un gaz inerte ou faiblement actif. L'apport de matière se fait par une goutte de métal fondue issue de la fusion de l'électrode. Plusieurs régimes de transferts sont possibles en fonction des tensions et intensités de courant utilisées. Chacun de ceux-ci permet d'atteindre des pénétrations et formes de cordons très différentes, rendant ainsi ce procédé très flexible.

Pour simuler les transferts de masse et de chaleur apparaissant au cours d'une opération de soudage il est nécessaire de modéliser le couplage entre l'arc (plasma thermique), l'électrode en fusion, les gouttes et le bain de soudage. La formation de la goutte, son détachement, sa pénétration dans le bain et le transfert d'énergie associé devront aussi être modélisés. De tels modèles, aujourd'hui 2D, commencent à émerger à l'international ([Hu2007 I&II] [Fan2004] [Wang 2001]) et montrent des perspectives intéressantes à moyen terme (3 à 6 ans). Ces modèles restent néanmoins encore peu représentatifs d'un processus réel de soudage du fait qu'ils ne soient pas traités en 3D. Le déplacement de la torche de soudage utilisée lors d'une opération réelle de soudage entraîne une perte de la symétrie axiale des principaux phénomènes (champ de température et écoulement du métal fondu).

Des travaux de thèse ont débuté en 2005 au CEA en ce sens pour le procédé de soudage à l'arc TIG (sans apport de matière). Les résultats permettront d'accéder à des simulations de ce procédé avec un couplage entre la magnétohydrodynamique du plasma d'arc et la thermo-hydraulique du bain de soudage.

La première partie du travail consistera à se mettre au niveau de l'état de l'art en ce qui concerne la modélisation de l'apport de matière en 2D, puis à passer à un modèle 3D représentatif de la dynamique du bain de soudage et avec un modèle de goutte simplifié. Cet

apport de matière sera pris en compte dans le modèle en respectant les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie du système; le diamètre, la vitesse d'impact des gouttes seront tirés du modèle de gouttes simplifié. L'ensemble des développements numériques sera réalisé avec le logiciel Cast3M. Le passage à une modélisation 3D permettra d'effectuer des analyses qui seront comparés aux expériences réalisées et dimensionnées au laboratoire.

[Hu2007 I]

Hu, J. and Tsai, H.L., "Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.50, 2007, pp. 833-846.

[Hu2007 II]

Hu, J. and Tsai, H.L., "Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part II: The metal", International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, vol.50, pp. 808-820.

[Fan2004]

Fan2004,

Fan, H.G. AND Kovacevic, R., "A unified model of transport phenomena in gas metal arc welding including electrode, arc plasma and molten pool", Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, vol. 37, pp. 2531-2544.

[Wang 2001]

Wang, Y. and Tsai, H.L., "Impingement of filler droplets and weld pool dynamics during gas metal arc welding process", International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, vol. 44, pp 2067-2080.

Propagation des fissures de clivage dans un acier de cuve sous choc thermique

stephane.marie@cea.fr

De nombreux travaux de R&D ont permis de proposer et d'étudier différents critères d'amorçage de la rupture fragile des acier de cuve. Par contre, peu de travaux ont été consacrés à la propagation et l'arrêt d'une fissure de clivage. La thèse de Benoit Prabel (2004-2007) réalisée au laboratoire sur ce sujet a apporté des résultats très intéressants et prometteurs.

Cependant, un travail pour approfondir les résultats et les justifier physiquement reste à mener : la dépendance de la contrainte critique du critère proposé avec la vitesse de déformation reste à confirmer avec des essais complémentaires à d'autres températures que celle considérée par Benoit Prabel, avec le même type d'essais (éprouvettes de mécanique de la rupture de type CT ou anneaux en compression). Ceci permettra ainsi d'une part de confirmer le lien possible entre cette contrainte avec la limite d'élasticité du matériau, et d'autre part d'étudier sur ce sujet le rôle de la température sur cette contrainte critique. La dernière partie de la thèse sera à partir des résultats obtenus d'interpréter un essai analytique de rupture fragile sous choc thermique, cette configuration se rapprochant du cas réel considéré.

Approche expérimentale et numérique du soudage par résistance du gainage combustible d'un réacteur nucléaire de quatrième génération

arnaud.monnier@cea.fr

Parmi les éléments d'un réacteur de quatrième génération à caloporteur sodium tel qu'envisagé actuellement, le gainage entourant le combustible nucléaire sera particulièrement sollicité sous des hautes températures. Actuellement composés d'acier inox dans les réacteurs à neutrons rapides, ces matériaux ne conviendront plus. Les aciers renforcés par dispersion d'oxydes, dits ODS (Oxide Dispersion Strengthened), font partie des candidats potentiels pour leur remplacement. Leur tenue à la corrosion et leurs propriétés mécaniques à haute température leur confèrent un comportement intéressant pour l'application visée. En

revanche, ces aciers ODS tirent leurs bonnes propriétés mécaniques à haute température de la présence d'oxydes de taille nanométrique dispersés uniformément dans la matrice métallique. Un passage par l'état liquide lors de l'opération de soudage peut modifier cette microstructure particulière de l'alliage [1, 2]. Les procédés de soudage en phase solide apparaissent donc comme attrayants, et en particulier, le soudage par résistance [3, 4, 5]. Ce procédé de soudage utilise la chaleur générée par effet Joule dans les pièces que l'on veut souder, un courant électrique les traversant.

L'objectif principal de la thèse est l'optimisation de la soudabilité d'une nuance d'acier ODS assemblée par le procédé de soudage par résistance.

Deux approches seront menées en parallèle : l'une expérimentale, allant de la réalisation des soudures à leur caractérisation et l'autre, numérique, avec prise en compte des paramètres de soudage ainsi que des modifications microstructurales dans l'acier ODS.

L'approche numérique devra simuler les phénomènes liés au choix des paramètres du procédé de soudage. La simulation numérique prendra en compte les phénomènes électriques, thermiques et mécaniques ainsi que les transformations métallurgiques ayant lieu dans les pièces durant le procédé de soudage. Cette simulation, basée sur une méthode de calcul par éléments finis, permettra de mieux comprendre par exemple l'influence de la force appliquée sur les pièces, du choix de l'intensité du courant de soudage ou encore de la durée de soudage avec pour but l'optimisation des conditions d'essais.

En parallèle sera menée une campagne d'essais avec des pièces présentant une géométrie représentative des gaines combustibles. Actuellement, un banc d'essais est en cours de conception. Il sera installé au CEA pour la réalisation de ces essais de soudage par résistance et sera instrumenté pour suivre en continu les paramètres du soudage (force, tension, déplacement, température...). Cette approche pourra être basée sur la méthode des plans d'expériences pour mener une étude paramétrique, améliorer la compréhension des processus et optimiser l'assemblage des gaines en aciers ODS. Ces essais expérimentaux permettront de valider les résultats issus de l'approche numérique. Ils conduiront aussi à une vision plus globale du problème, avec notamment la détermination de la surface de contact optimale entre les deux pièces à assembler.

A la suite et en parallèle de ces essais, des tests de caractérisation des joints soudés seront réalisés sur pièces « réelles » et sur échantillons avant et après sollicitations thermomécaniques. Pour ce faire, la microstructure du joint et de son environnement sera déterminée par des observations en microscopies optique et électronique. De plus, l'utilisation de techniques de caractérisation telles que la diffraction des rayons X et la micro-analyse X, viendront compléter l'étude. Les caractéristiques mécaniques des soudures seront estimées par des mesures de dureté et des tests de traction à différentes températures et elles seront corrélées avec les paramètres de soudage. Des contrôles non destructifs pourront être réalisés (imagerie ultrasons, radiographies X...) avant et après essais.

Au final, nous aurons à disposition un domaine de soudabilité expérimental et un modèle fiable qui permettra d'optimiser les soudures réalisées, en prenant en compte des paramètres matériaux (par exemple : taille et répartition des nanoparticules d'oxydes dans la matrice métallique), des paramètres procédés (force, intensité, température, vitesse de soudage...) et des paramètres géométriques (forme des pièces, surface de contact...).

Le candidat pourra acquérir des compétences doubles via une démarche numérique confortée par une approche expérimentale (réalisation d'essais de soudage et tests de caractérisation).

Le doctorant acquerra des connaissances techniques pluridisciplinaires de haut niveau.

La collaboration entre le CEA et l'ICMCB permettra au doctorant de découvrir le monde de la Recherche dans deux environnements différents et de développer des qualités relationnelles.

Références

[1] H.D. HEDRICH, H.G. MAYER, G. HAUFLER, M. KOPF, N. REHEIS
Joining of ODS-superalloys

High Temperature Materials for Power Engineering 1990, Part 1
Proceedings, Liege, 24-27/09/1990, p.789-798

[2] L.E. SHOEMAKER

Joining techniques for a ferritic oxide dispersion strengthened alloy

Advances in welding science and technology

Proceedings, Gattingburg, TN, USA, 18-22 May 1986

[3] S. DE BURBURE

Resistance welding of pressurized capsules for in-pile creep experiments

Welding Journal, Nov. 1978

[4] L.R. ZIRKER, J.H. BOTTCHEER, S. SHIKAKURA, C.L. TSAI, M.L. HAMILTON

Fabrication of oxide dispersion strengthened ferritic clad fuel pins

International Conference on Fast Reactors and related Fuel Cycles, Kyoto, Japan, 28-31

October 1991

[5] M. SEKI, K. HIRAKO, S. KONO, Y. KIHARA, T. KAITO, S. UKAI

Pressurized resistance welding technology development in 9 Cr-ODS martensitic steels

Journal of Nuclear Materials 329-333, 2004, 1534-1538