

MODÉLISATION DE LA FISSURATION INTER-GRANULAIRE PAR CORROSION SOUS CONTRAINTES POUR LES ACIERS INOXYDABLES

T. Couvant, S. Meunier (EDF / R&D); D. Haboussa, J.-M. Proix (EDF / R&D / AMA)

CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA MODÉLISATION

Le projet CORIOLIS (2012-2016) vise à développer des modèles prédictifs d'amorçage et de propagation de la corrosion sous contrainte intergranulaire (IGSCC) qui affecte les alliages à base nickel et les aciers inoxydables austénitiques exposés au milieu primaire des réacteurs à eau sous pression. L'IGSCC résulte d'une interaction entre le matériau (teneur en chrome), l'eau (température, pH, potentiel) et la sollicitation mécanique. De plus, les propriétés du matériau évoluent sous l'effet d'une irradiation (projet PERFORM60).

Une simulation de l'IGSCC est développée avec *Code_Aster* à l'échelle de l'agrégat polycristallin afin d'évaluer quantitativement les couplages matériau-chimie-mécanique supposés qui sont impliqués dans l'amorçage et la propagation de fissures. La validation des couplages permettra de développer des modèles d'ingénierie plus prédictifs.

On s'intéresse ici à l'IGSCC des aciers inoxydables affectant par exemple les cannes chauffantes de pressuriseur et la visserie. La simulation couple la diffusion de l'oxygène avec le calcul mécanique d'un polycristal, dans lequel les joints de grains sont modélisés par des zones cohésives (CZM) susceptibles de rompre si elles sont affaiblies par l'oxydation, qui est favorisée par la déformation plastique.

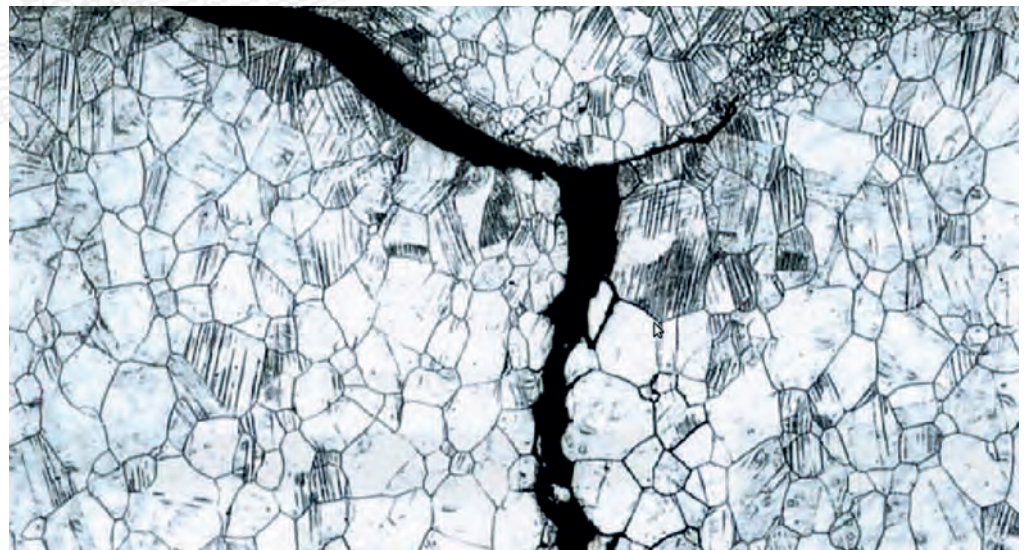


Figure 1: Fissure inter-granulaire due à l'IGSCC.

PRINCIPE DE LA MODÉLISATION ET AJUSTEMENT DES DONNÉES

On simule une expérience de traction à vitesse de déformation imposée sur un agrégat cubique de côté 0,01 mm, comportant 21 grains maillés en éléments tétraédriques. La modélisation est mise au point sur ce petit agrégat puis appliquée à des agrégats de plus grande taille (0,1 mm de côté). L'allongement imposé croît linéairement pour atteindre 30%.

Expérimentalement, l'amorçage apparaît après environ 10% d'allongement, et la fissure croît lentement jusqu'à un allongement d'environ 25%.

La simulation comporte une boucle en temps (secondes), avec pour chaque incrément de temps (1h) une résolution mécanique, une résolution de diffusion, et une adaptation du maillage via la commande `MACR_ADAP_MAIL`: les mailles au contact de l'eau sont raffînées pour permettre le couplage mécanique-oxydation, alors que les mailles cassées sont déraffinées. Puis, les éléments joints sont recréés, en cohérence avec le nouveau maillage. Enfin, les champs sont projetés sur ce maillage avec joints.

La diffusion d'oxygène suit une loi de Fick dont le coefficient de diffusion D dépend de la déformation plastique, du pH et de l'irradiation. La face de l'agrégat en contact avec l'eau et les joints de grains rompus ont une concentration imposée en oxygène.

Les paramètres de diffusion de l'oxygène sont recalés à l'aide des algorithmes d'optimisation par comparaison à une loi empirique unidimensionnelle donnant la profondeur d'oxydation en fonction du temps, du pH, de la déformation plastique et de l'irradiation.

Le comportement des grains est de type monocristallin afin de reproduire les concentrations de contraintes résultant des interactions entre grains voisins orientés différemment.

La loi cohésive `CZM_LIN_REG` a tout d'abord été utilisée, puis les lois `CZM_OUV_MIX`, `CZM_TAC_MIX` appliquées sur des éléments d'interface. La contrainte critique des éléments `CZM` décroît de 4000MPa à 500MPa sous l'effet de l'oxydation.

MODÉLISATION DE LA FISSURATION INTER-GRANULAIRE PAR CORROSION SOUS CONTRAINTES POUR LES ACIERS INOXYDABLES

T. Couvant, S. Meunier (EDF / R&D); D. Haboussa, J.-M. Proix (EDF / R&D / AMA)

RÉSULTATS OBTENUS

La Figure 2 présente les iso-valeurs des concentrations en oxygène aux joints de grains de l'agrégat, ainsi que la fissuration obtenue (variable interne d'endommagement) pour un pH à 320°C égal à 8. La profondeur d'oxydation est faible, ce qui requiert un fort raffinement local du maillage. On peut également estimer la profondeur de fissure, en examinant simplement toutes les mailles CZM fissurées, et en retenant celles dont l'abscisse est la plus éloignée de la face où la concentration est imposée.

PREMIER BILAN ET PERSPECTIVES

- La simulation présentée permet de reproduire, sur de petits agrégats, des phénomènes observés expérimentalement : branchement et coalescence des fissures, effets du pH, effet de l'irradiation;
- les outils développés devraient permettre de réaliser des simulations à de plus grandes échelles : plus gros agrégats, visserie;
- la simulation actuelle repose sur des modèles phénoménologiques qui pourraient être remplacés progressivement par des modèles plus physiques. De nouveaux ingrédients pourraient être considérés (diffusion de l'hydrogène et du chrome dans le métal).

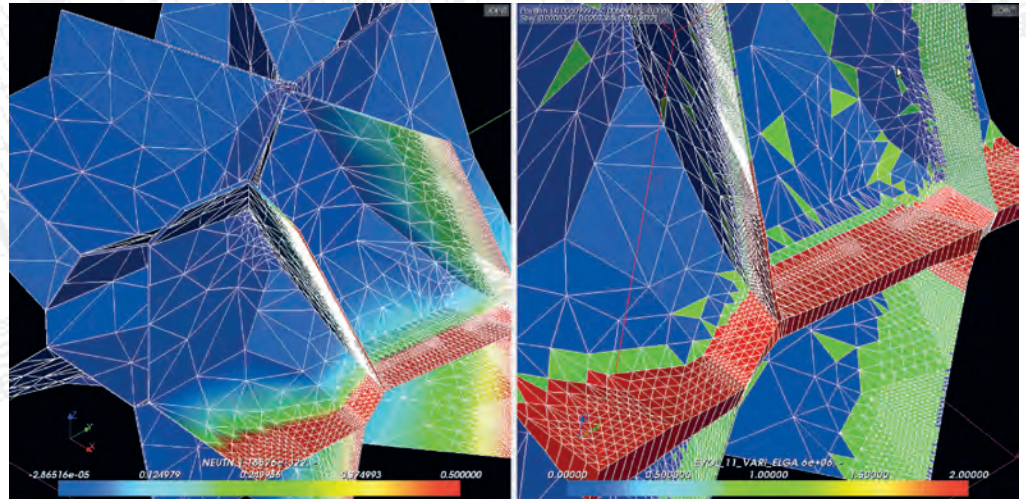


Figure 2 : Joints de grains oxydés (en rouge, à gauche) et rompus (en rouge, à droite).

Les longs temps de calcul induits par la difficulté d'intégrer les équations des comportements cristallins, en particulier en grandes déformations, sont à optimiser (usage de MFront); la simulation actuelle, entièrement contenue dans des fichiers de commandes, pourrait être gérée dans l'environnement Salome, en utilisant le module Homard pour le raffinement-déraffinement du maillage et la création des éléments de joints, via un schéma YACS.

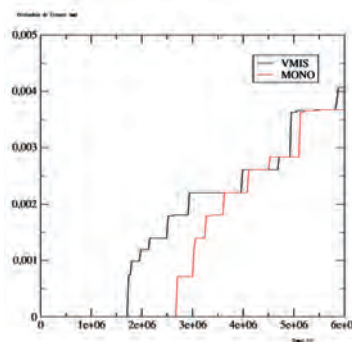


Figure 3 : Profondeur de fissuration en fonction du temps et de la loi de comportement mécanique choisie.

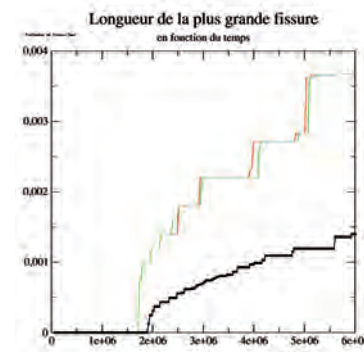


Figure 4 : Effet du pH sur la profondeur de fissuration en fonction du temps.