

## Etude expérimentale et numérique en trois dimensions du développement en fatigue d'une fissure déversée dans une tôle mince

Lors de la fissuration par fatigue des tôles minces, si la vitesse de propagation de la fissure excède un seuil dépendant du matériau et souvent assez faible, la fissure ne se propage pas en mode d'ouverture, dans un plan normal à l'axe de traction, mais se déverse latéralement d'environ 45° le long de « lèvres de cisaillement » initialement superficielles, mais qui couvrent une fraction croissante de l'épaisseur. Le long du front de fissures partiellement ou totalement déversées, les *trois modes* sont présents, en proportions variables et la loi de Paris pour le mode I devient inadéquate pour décrire la cinétique de propagation. Alors que le développement de lèvres de cisaillement est relativement bien compris et modélisé en rupture ductile, tel n'est pas le cas en fatigue, domaine pour lequel n'existent que des approches phénoménologiques et surtout uniquement bidimensionnelles d'un phénomène *éminemment tridimensionnel*. Il s'agit pourtant d'un problème important pour la fiabilité des structures minces, comme par exemple, les fuselages d'avions.

Les propagations gauches de fissures de fatigue dans un alliage d'aluminium 7075-T6 et un acier doux S355 ont été caractérisées expérimentalement dans l'air et dans une solution corrosive d'eau salée sur des éprouvettes CCP (Center Crack Panel) à différentes amplitudes de chargement. Une technique de marquage de fronts, par réduction périodique du rapport de charge, couplée à une reconstruction topographique en trois dimensions de la surface fissurée, par microscopie optique numérique, a permis de caractériser le trajet tridimensionnel et la vitesse de propagation de la fissure en tout point du front. Des profils transverses à différents pas de propagation ont permis de quantifier l'angle de déversement et des profils longitudinaux l'angle de bifurcation.

Une étude de la forme des fronts de fissure a mis en évidence une réduction de leur convexité à mesure du déversement, malgré une chute de  $\Delta K_I$  dans les zones déversées, ce qui révèle la contribution importante des modes II et III, en plus du mode I, dans ces zones. Ce mode mixte a été également révélé par des observations au MEB où l'on remarque, dans la région déversée, des traces ponctuelles de frottement (typiques des modes de cisaillement) accompagnées de stries (typiques du mode I).

Parallèlement à ce travail expérimental, une étude numérique est menée. Un outil de maillage de la surface fissurée sur Salome-Meca, à partir de la topographie mesurée, a été développé.

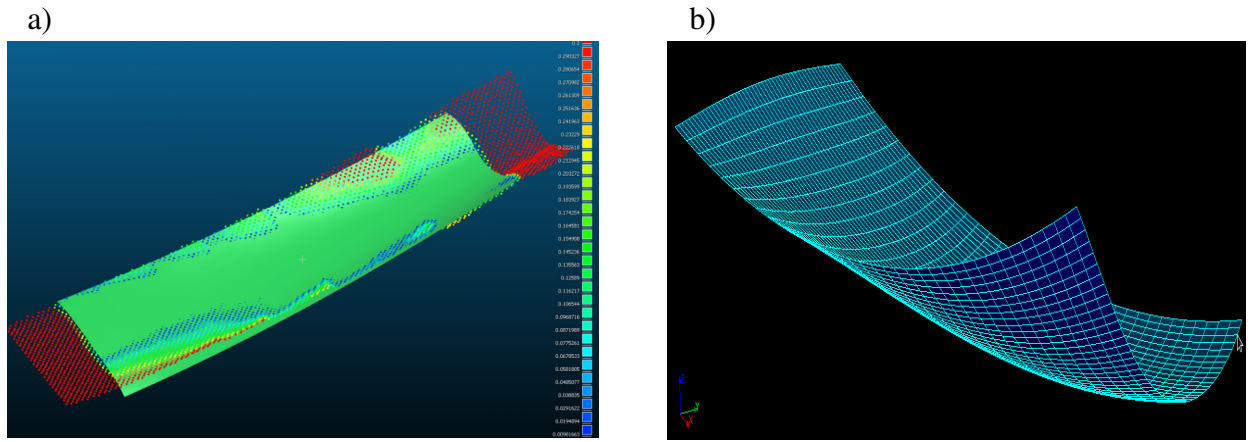


Figure - Nappe représentative de la fissure réelle (a), Maillage de la fissure réelle (b).

Dans un cadre XFEM élastique (sous *Code\_Aster*), les facteurs d'intensité des contraintes liés aux modes I, II et III, présents en proportions variables le long du front de la fissure déversée, ont été calculés via la méthode G- $\theta$ , modifiée en raison de la convexité des fronts de fissure et l'erreur associée sur le calcul des SIF a été numériquement quantifiée. Alors que la corrélation des vitesses de propagations expérimentales avec  $\Delta K_I$  est peu satisfaisante, la corrélation avec  $\Delta K_{eq} = \sqrt{\Delta K_I^2 + \Delta K_{II}^2 + \frac{1}{1-\nu} \Delta K_{III}^2}$  est correcte à différents niveaux de propagation soulignant une fois de plus la contribution majeure des modes de cisaillement dans la force motrice de la fissuration. Une analyse éléments finis (sous *Castem*) en élasto-plasticité couplée à l'application d'un critère de fatigue local, de type plan critique, dépendant de l'amplitude de déformation équivalente devant le front de fissure a permis de prédire qualitativement la croissance des lèvres de cisaillement dans l'aluminium.

Une modification de la méthode X-FEM est finalement proposée afin de mieux prendre en compte la plasticité cyclique. L'objectif ultime étant d'arriver à simuler la propagation de fissure en élasto-plasticité cyclique, ce qui est un verrou scientifique majeur de la méthode X-FEM. L'ensemble de cette partie repose sur une étude analytique qui suggère de remplacer l'enrichissement discontinu « Heaviside », introduit dans la méthode X-FEM standard et qui oblige à intégrer numériquement de part et d'autre de la discontinuité, par un nouvel enrichissement continu sur les éléments coupés par la fissure. Le sous-découpage des éléments traversés par la fissure, responsable d'une projection de champ introduisant une erreur systématique dans les calculs numériques, est ainsi évité. Il en résulte également une réduction significative du nombre de points d'intégration numérique, ce qui diminue les temps de calcul. Cette méthode analytique est ensuite adaptée au formalisme des méthodes d'intégrations numériques puis implémentée en élasticité et élasto-plasticité dans *Code\_Aster*. Des premiers « cas-test » de comparaison en élasticité et élasto-plasticité entre la méthode X-FEM standard et la nouvelle méthode d'intégration démontrent la potentialité de la méthode sans sous-découpage. Malgré une réduction significative du nombre des points d'intégration les taux de convergences de cette méthode sont tout à fait corrects et les champs de déplacements solutions sont très proches en élasticité. En revanche, des développements plus poussés sont nécessaires en plasticité.