25/08/2025

ADDL

Comment ANSYS anticipe la rupture

www.addl.fr
contact@addl.fr
01 46 15 71 11

Table des matières

I. Introduction 3

II. La procédure ANSYS pour l'analyse de la fatigue 3

III. Quels sont les outils d'aide disponibles ? 3

1. Insertion de la fissure en utilisant le fracture meshing 3

2. Évaluation des paramètres de fracture pour les maillages tétraédriques avec UMM 4

3. La simulation de la propagation de la fissure avec SMART : Separating morphing and adapataive remesheing technologie 5

IV. Validation et applications pratiques de SMART Crack 8

V. Conclusion 12

I. Introduction

La **fissuration par fatigue** est l'un des principaux modes de défaillance des structures mécaniques soumises à des chargements cycliques (aéronautique, automobile, électronique, énergie…). Savoir prédire l'initiation et la propagation des fissures permet d'optimiser la durée de vie des composants et d'éviter des pannes coûteuses.

Dans cet article, nous montrerons comment **ANSYS Mechanical**, avec son **module Fracture**, permet de simuler la propagation des fissures et d'estimer la durée de vie en fatigue.

II. La procédure ANSYS pour l'analyse de la fatigue

Dans le domaine de la mécanique des structures et du génie mécanique, la capacité à prédire avec précision **la croissance des fissures** est un enjeu important pour garantir la sécurité et la durabilité des composants soumis à des sollicitations mécaniques répétées. La présence de fissures dans une structure, qu'elles soient issues d'un défaut initial ou qu'elles apparaissent en cours de vie, peut entraîner des conséquences dramatiques si leur évolution n'est pas maîtrisée.

L'analyse de la propagation des fissures permet non seulement d'évaluer l'état de santé d'un composant, mais également d'estimer **sa durée de vie résiduelle** et de planifier des actions de maintenance adaptées.

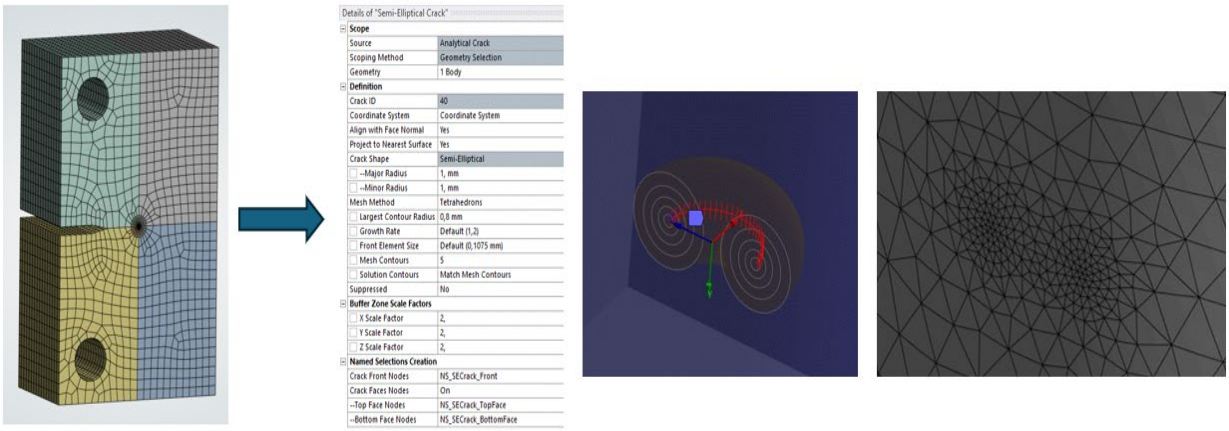
Dans ce contexte, les outils numériques tels que le logiciel **ANSYS** jouent un rôle central, en fournissant des environnements de simulation avancés qui facilitent la mise en œuvre de méthodologies **d'analyse de la fissuration**.

III. Quels sont les outils d'aide disponibles ?

1. Insertion de la fissure en utilisant le fracture meshing

L'insertion de fissures dans ANSYS à l'aide de la fonctionnalité Fracture Meshing permet de modéliser avec précision les phénomènes de rupture dans les structures. Plusieurs types de fissures peuvent être introduits en fonction de la nature du défaut et de la géométrie de la pièce. Les fissures semi-elliptiques sont couramment utilisées pour représenter des défauts de surface, notamment dans les tuyaux ou plaques soumises à la fatigue ou à la corrosion.

Les fissures arbitraires offrent une grande flexibilité en suivant des trajectoires complexes ou réelles, souvent issues de contrôles non destructifs. Enfin, les fissures pré-maillées permettent une maîtrise totale du maillage autour du front de fissure, en particulier pour les analyses avancées où les critères de propagation exigent une modélisation locale très précise. Cette approche permet de générer un maillage spécifique autour du crack tip, condition essentielle pour extraire les facteurs d'intensité de contrainte et prédire la direction de propagation dans le cas de chargements en mode mixte.



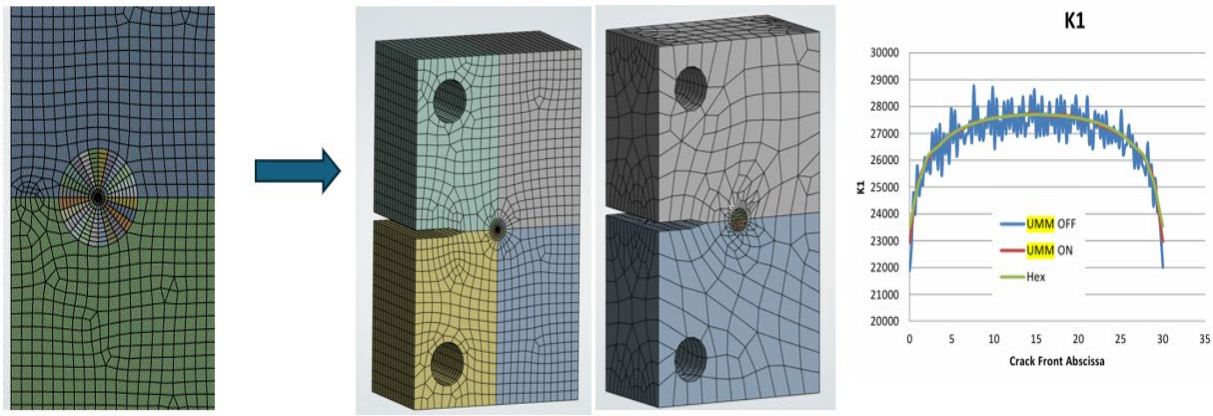
2. Évaluation des paramètres de fracture pour les maillages tétraédriques avec UMM

La méthode **UMM (Unstructured Mesh Method)** est une technique numérique développée pour améliorer la précision du calcul des paramètres de fracture, comme le J-intégral ou les facteurs d'intensité des contraintes, lorsqu'on travaille avec des maillages non structurés.

En mécanique de la rupture, les maillages hexaédriques structurés sont généralement privilégiés, car ils permettent d'obtenir des résultats très précis. Cependant, dans de nombreux cas pratiques, notamment pour les géométries complexes en 3D, il est difficile, voire impossible, de générer ce type de maillage. On se tourne alors vers des maillages non structurés, comme les maillages tétraédriques ou des hexaédriques irréguliers.

Le problème est que les méthodes classiques de calcul de paramètres de rupture donnent alors souvent des résultats instables ou approximatifs. C'est là qu'intervient la méthode UMM : elle permet de conserver une très bonne précision dans le calcul de ces paramètres, même sur des maillages non structurés.

Grâce à cette approche, on peut donc utiliser des maillages générés automatiquement tout en conservant une fiabilité comparable à celle obtenue avec des maillages structurés, ce qui est un avantage considérable en pratique.



3. La simulation de la propagation de la fissure avec SMART : Separating morphing and adapataive remesheing technologie

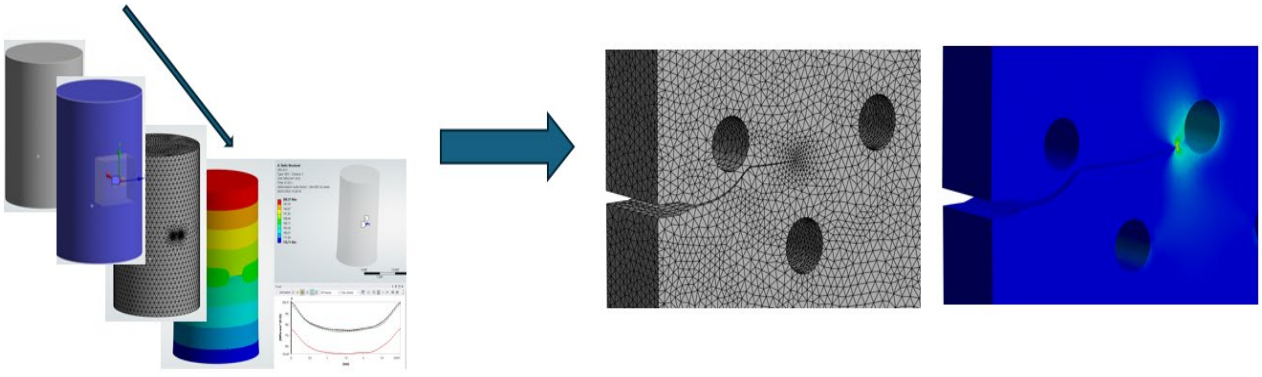
La fonctionnalité Smart Crack Growth d'ANSYS marque une avancée majeure dans le domaine de la simulation numérique de la propagation des fissures tridimensionnelles. Contrairement aux méthodes classiques qui exigent des interventions manuelles à chaque étape de croissance de la fissure, notamment pour le remaillage local, cette technologie propose une solution entièrement automatisée, intégrée directement au solveur éléments finis. Cela permet un suivi continu et précis de l'évolution des fissures, sans interruption du calcul, même dans des configurations géométriques complexes ou sous des conditions de chargement variables.

Le processus débute par une analyse classique par éléments finis, incluant la définition du matériau, des conditions aux limites et de la géométrie initiale de la fissure (forme, orientation, localisation). Sous l'effet de chargements mécaniques ou thermomécaniques, l'algorithme suit la croissance incrémentale de la fissure en recalculant, à chaque étape, les facteurs d'intensité de contrainte (SIFs) ou d'autres critères de rupture comme le taux de restitution d'énergie. L'innovation réside dans l'utilisation de la technologie S.M.A.R.T, qui permet un remaillage local intelligent autour du front de fissure.

Ce remaillage adaptatif se décompose en trois étapes clés :

1. *Morphing intelligent* : le maillage existant est déformé de façon contrôlée pour suivre l'évolution géométrique de la fissure.
2. *Remaillage localisé* : seule la zone proche du front de fissure est remaillée, maintenant ainsi l'intégrité du maillage global et limitant les coûts de calcul.
3. *Projection de solution* : les champs mécaniques sont transférés avec précision sur le nouveau maillage, sans perte d'information ni dégradation des résultats.

Cette automatisation réduit considérablement le temps de simulation tout en augmentant la robustesse et la précision des résultats. Elle permet également de traiter des cas complexes tels que la propagation de fissures multiples, les chargements cycliques ou les comportements matériaux non linéaires. Grâce à son interface conviviale et sa puissance de calcul, **Smart Crack Growth** s'impose comme un outil incontournable dans les secteurs de l'aéronautique, de l'énergie ou de l'automobile pour évaluer la durée de vie résiduelle des structures, anticiper les ruptures critiques et optimiser les conceptions dès la phase de développement.



La **direction de propagation de la fissure** est évaluée selon le **critère de la contrainte circonférentielle maximale**, proposé par **[1]**. Ce critère repose sur l'hypothèse que la fissure s'étend dans la direction où la contrainte circonférentielle atteint son maximum, ce qui correspond à la voie de propagation la plus énergétiquement favorable. En d'autres termes, la croissance s'effectue naturellement là où le matériau est soumis à la sollicitation la plus critique en périphérie du front de fissure. Ce principe est couramment utilisé dans les analyses de rupture en mode mixte.

D'après ce critère, **l'angle de propagation de la fissure** peut être estimé à l'aide de la formule suivante, telle que présentée notamment par **[2,3]** :

$$\theta = cos^{-1}\left(\frac{3K_{II}^2 + K_I\sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2}\right)$$

L'**angle de propagation de la fissure** est déterminé à partir des composantes du **facteur d'intensité de contrainte** associées aux modes I et II, notées respectivement K_I, K_{II}. Ces composantes traduisent les sollicitations d'ouverture (mode I) et de cisaillement dans le plan (mode II) agissant au voisinage du front de fissure.

La direction de propagation résulte donc d'un équilibre entre ces deux effets, selon les critères de rupture adaptés aux chargements en mode mixte.

Par ailleurs, la **vitesse de propagation de la fissure**, notée $^{da}/_{dN}$, est estimée à l'aide d'une **formule modifiée de la loi de Paris** [4]. Cette version intègre un **facteur d'intensité de contrainte équivalent**, noté ΔK, défini comme une combinaison pondérée de ΔK_I et ΔK_{II}, en tenant compte de l'orientation locale de la fissure. Ce facteur unifié permet de représenter efficacement la contribution conjointe des différents modes de chargement sur la croissance de la fissure, en particulier dans le cadre d'analyses tridimensionnelles complexes où les effets de mode mixte sont significatifs.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

La plage équivalente du facteur d'intensité des contraintes est déterminée comme suit [2] :

$$\Delta K_{éq} = \frac{1}{2}cos\frac{\theta}{2}[(\Delta K_I(1 + cos\theta)) - 3\Delta K_{II}sin\theta]$$

L'approche **Smart Crack Growth** dans ANSYS s'inscrit dans une logique de simulation itérative. À chaque incrément de propagation, la fissure est étendue dans la direction prédite, le champ de contraintes est mis à jour, et le logiciel adapte automatiquement le maillage autour de la zone fissurée. Ce mécanisme permet d'éviter les erreurs liées à des approximations géométriques ou des discontinuités numériques, et assure une grande fidélité des résultats sur toute la durée de la simulation.

À l'issue de l'analyse, l'utilisateur peut visualiser l'évolution de la fissure, analyser la distribution des contraintes et évaluer les zones critiques de la structure. Ces informations sont précieuses pour déterminer la durée de vie résiduelle d'un composant, anticiper les risques de rupture et prendre des décisions éclairées en matière de maintenance, de réparation ou de remplacement.

En somme, l'outil **Smart Crack Growth** offre aux ingénieurs une solution puissante pour la simulation avancée de la propagation des fissures. Il combine rigueur théorique, robustesse numérique et efficacité opérationnelle. Grâce à sa capacité à gérer automatiquement les aspects géométriques, mécaniques et numériques de la fissuration, il constitue un atout majeur pour les industries où la fiabilité structurelle est une priorité, comme l'aéronautique, l'automobile, l'énergie ou le génie civil. Il permet également d'intégrer **des analyses de fatigue** dans une démarche plus globale de maintenance prédictive et de gestion du **cycle de vie des structures**, en contribuant à une meilleure compréhension des mécanismes de rupture et à l'optimisation des conceptions pour prolonger la durée de vie des systèmes.

Ce module se distingue par son approche entièrement intégrée, combinant des outils de modélisation avancée, de maillage intelligent et de résolution numérique haute performance. Il propose plusieurs workflows flexibles, notamment la **sous-modélisation locale via Workbench/Mechanical**, qui permet de concentrer les ressources de calcul sur des zones critiques, ainsi que la **prise en charge des géométries importées** avec maillages existants, facilitant l'analyse de structures complexes ou issues de chaînes de conception externes.

Le module intègre également des fonctionnalités avancées de maillage de fissures, telles que **la gestion de fissures internes**, **de fronts multiples**, ou encore **l'initiation automatique de fissures** via des commandes **APDL**, sans nécessité d'intervention manuelle.

Sur le plan numérique, **SMART Crack Growth** optimise les performances grâce à **des algorithmes de remaillage adaptatif**, notamment le **grossissement de maillage intelligent (mesh coarsening)** et un **contrôle dynamique de la taille de l'extension des fissures**, garantissant une précision localisée sans surcharger inutilement le modèle global.

Il exploite pleinement les architectures **HPC** en **SMP (Shared Memory Parallel)** et **DMP (Distributed Memory Parallel)**, tout en supportant différents solveurs, y compris **Direct** et **PCG (Preconditioned Conjugate Gradient)**, assurant ainsi une résolution efficace même pour les cas industriels les plus complexes.

Sur le plan physique, la solution offre une large gamme de capacités : elle intègre **des modèles de fatigue avancés** pour prédire de manière réaliste la vitesse de propagation, **l'importation de contraintes résiduelles ou initiales** pour améliorer la précision des analyses, l'**application du principe de superposition de Bueckner** pour simplifier les calculs en mécanique de la rupture, ainsi que des **critères d'arrêt personnalisables** pour contrôler la croissance de la fissure.

Elle permet en outre de simuler **des chargements complexes** (non proportionnels, tabulaires), **des contacts non linéaires entre lèvres de fissures**, et **des chargements cycliques intégrant un comptage de cycles de type Rainflow**. L'ensemble des **modes de rupture I, II et III** est pris en charge, rendant la solution parfaitement adaptée aux cas de **chargement mixte**.

Grâce à cette combinaison puissante de précision physique, de robustesse numérique et de flexibilité opérationnelle, SMART Crack Growth s'impose comme un outil de référence pour les ingénieurs en **fiabilité structurelle**, en **durée de vie résiduelle**, ou en **optimisation de conception**. Il est particulièrement pertinent dans des secteurs critiques tels que **l'aéronautique**, **l'énergie** ou **l'automobile**, où la maîtrise des phénomènes de fissuration est essentielle pour garantir sécurité, performance et durabilité.

IV. Validation et applications pratiques de SMART Crack

Le cas d'étude porte sur **une plaque en mortier de ciment** comportant une fissure en bord de plaque. Ce type de configuration est représentatif de composants fragiles soumis à des conditions mécaniques sévères, où la présence de trous et de défauts de type fissure peut fortement influencer le comportement structurel. L'analyse s'intéresse ici à **la croissance statique** de la fissure en **mode mixte** (combinaison de modes I et II), afin d'évaluer la trajectoire de propagation.

On considère une plaque rectangulaire de dimensions **120 mm × 65 mm × 10 mm**, comportant deux trous de **10 mm** de diamètre situés près des extrémités, ainsi qu'un trou central de **20 mm** de diamètre, comme illustré à la Figure 1. Une **fissure initiale de 10 mm** est présente au bord du trou central, représentant une **fissure de rive**.

La plaque est soumise à un déplacement impose d'une valeur $\Delta u = 1e^{-3}$ mm et encastré dans l'autre trou. Le comportement du matériau est supposé **élastique linéaire**. Le modèle numérique initial a été construit dans ANSYS en utilisant la méthode **Smart Crack Growth** avec un maillage constitué d'éléments tétraédriques à 10 nœuds. La taille des éléments a été fixée à **1 mm**, ce qui a abouti à un maillage comportant **97 713 nœuds** et **56 362 éléments**, comme montré à la Figure 1b.

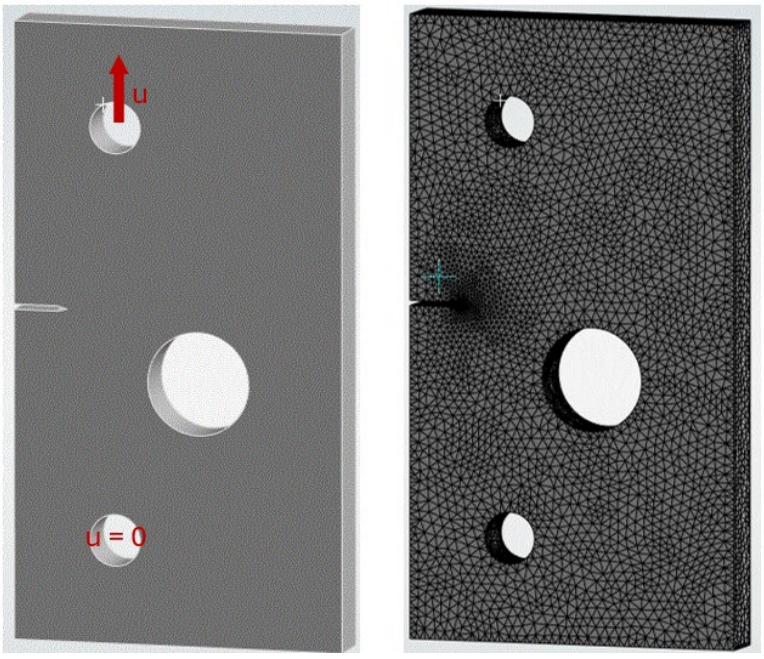


Figure 1 : Plaque entaillée avec trou. (a) le chargement (b) le maillage

Les résultats des calculs, présentés dans la figure 2, confirment le modèle de fissuration observé expérimentalement. La fissure se propage depuis l'entaille initiale en direction du grand trou, suivant une trajectoire influencée par la géométrie de la plaque. Cette propagation met en évidence un comportement en **mode mixte**, c'est-à-dire que la fissure est soumise simultanément à plusieurs types de sollicitations mécaniques. Plus précisément, la fissure dans le panneau perforé subit vraisemblablement une combinaison de Mode I (ouverture sous l'effet

de la traction) et de Mode II (cisaillement induit par la géométrie perforée ou les contraintes résiduelles).

La trajectoire de la fissure ne reste pas rectiligne, comme on l'observerait en Mode I pur, mais présente une courbure ou une bifurcation, caractéristique de l'effet du cisaillement. Ce comportement mixte favorise une propagation plus rapide de la fissure, car l'énergie nécessaire à son avancement est réduite par rapport à une propagation en Mode I seul. Par ailleurs, les perforations agissent comme des zones de concentration de contraintes, renforçant l'influence du Mode II et accentuant la déviation de la fissure.

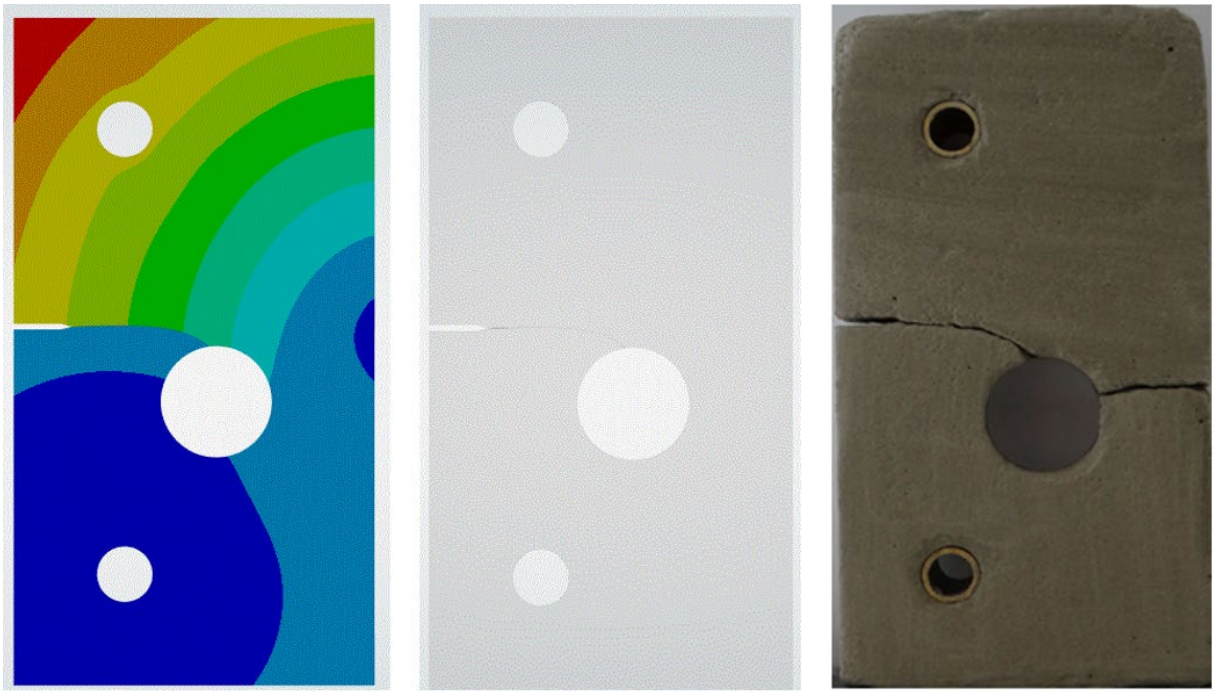
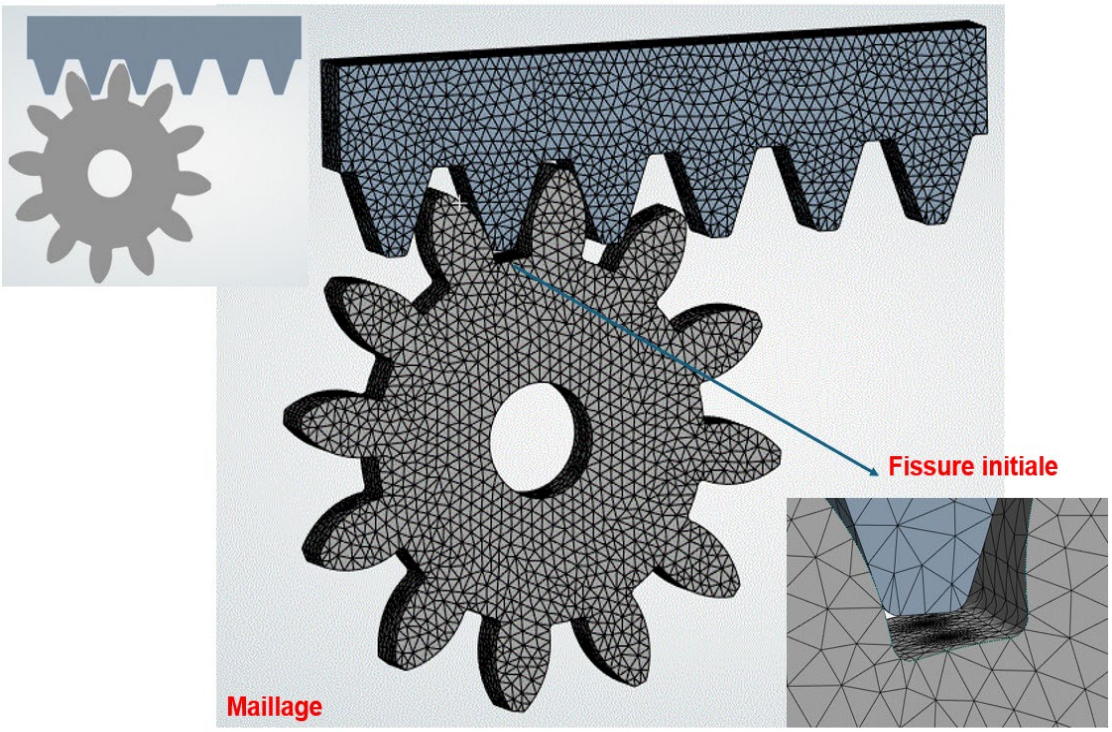


Figure 2 : Plaque entaillée avec trou. (a) résultat numérique (b) la trajectoire de la fissure (c) Échantillon fracturé [5]

La validation et les applications pratiques de la technologie SMART Crack Growth d'Ansys constituent une avancée majeure dans la modélisation réaliste des **phénomènes de contact** lors de la propagation de fissures. Cette solution intègre des fonctionnalités inédites permettant de surmonter les limites des approches traditionnelles, en particulier dans des contextes où les fissures interagissent avec **des zones en contact**, qu'il s'agisse de frottement, de glissement ou de contacts multiples répartis sur une géométrie complexe.

L'un des progrès technologiques les plus notables réside dans la capacité de SMART à gérer les contacts situés en dehors de la zone de remaillage (figure 3), ce qui permet de préserver l'intégrité de l'ensemble du modèle tout en adaptant localement la grille autour de la fissure. Cette avancée garantit une représentation fidèle des mécanismes d'interaction fissure-contact, essentiels à la prédiction de trajectoires réalistes. Des validations rigoureuses, illustrées notamment par l'étude de [6], montrent que le module reproduit avec précision le comportement observé expérimentalement, comme dans le cas emblématique de la propagation d'une fissure traversant la jante d'un engrenage épais, malgré la complexité géométrique et les interactions multiples.

Le remaillage adaptatif permet ici de suivre finement l'évolution de la fissure sans dégrader les zones critiques de contact. Cette capacité transforme radicalement les simulations industrielles : elle évite les simplifications géométriques ou mécaniques qui, jusqu'ici, biaisaient les résultats, et permet de concevoir des structures plus robustes et plus sûres, notamment dans les systèmes mécaniques sollicités tels que les engrenages, les liaisons boulonnées ou les interfaces structurelles complexes.



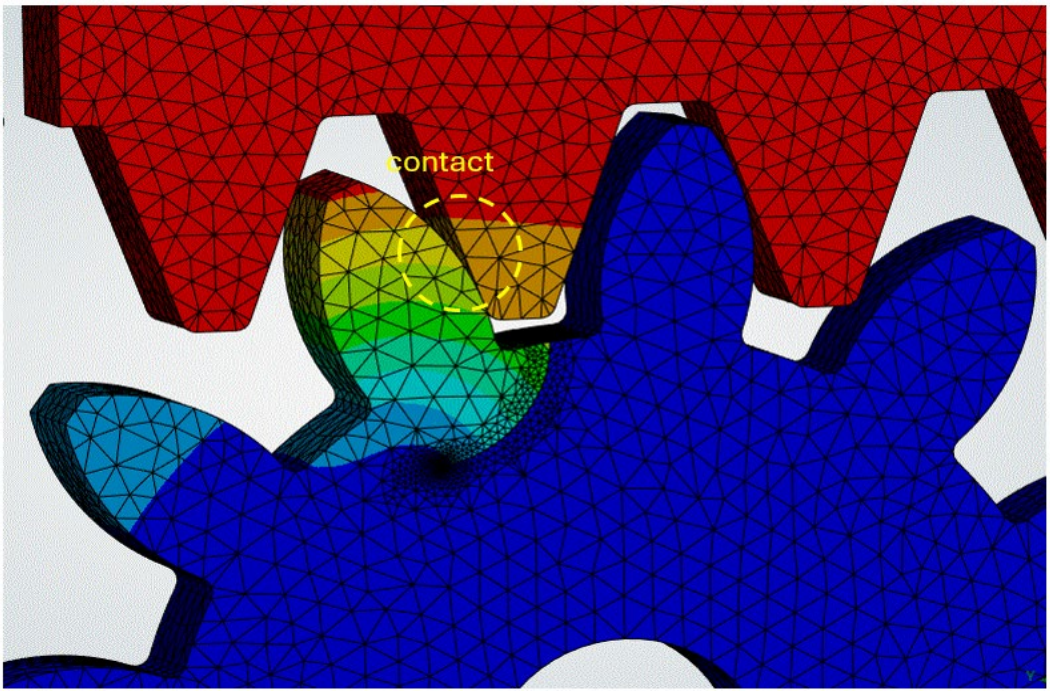


Figure 3 : le maillage, la fissure initiale et la prise en compte du contact

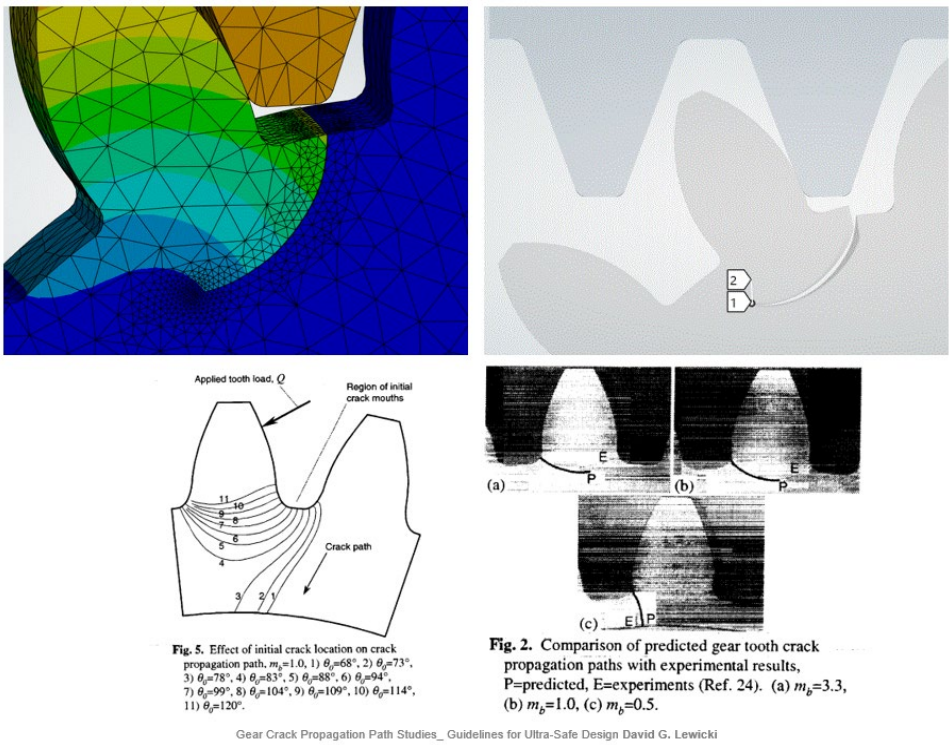


Fig. 5. Effect of initial crack location on crack propagation path, m_b=1.0, 1) θ_0=68°, 2) θ_0=73°, 3) θ_0=78°, 4) θ_0=83°, 5) θ_0=88°, 6) θ_0=94°, 7) θ_0=99°, 8) θ_0=104°, 9) θ_0=109°, 10) θ_0=114°, 11) θ_0=120°.

Fig. 2. Comparison of predicted gear tooth crack propagation paths with experimental results, P=predicted, E=experiments (Ref. 24). (a) m_b=3.3, (b) m_b=1.0, (c) m_b=0.5.

Gear Crack Propagation Path Studies_ Guidelines for Ultra-Safe Design David G. Lewicki

Figure 4 : (a) Propagation d'une fissure à travers la jante épaisse d'un engrenage (b) résultats expérimentaux [6]

Le troisième cas de validation utilise la même géométrie que celle du **premier cas**, mais cette fois-ci, le calcul porte sur la **fissuration par fatigue**, en considérant un matériau en **aluminium 7075-T6**. La longueur initiale de la fissure est $\mathbf{a_0 = 10\ mm}$. Une force $\mathbf{F = 2 \times 10^4\ N}$ est appliquée, et le comportement du matériau est supposé **élastique linéaire**. Les propriétés mécaniques de l'aluminium 7075-T6 sont les suivantes : **module d'élasticité** $\mathbf{E = 7{,}17 \times 10^4\ MPa}$ et **coefficient de Poisson** $\mathbf{\nu = 0{,}33}$

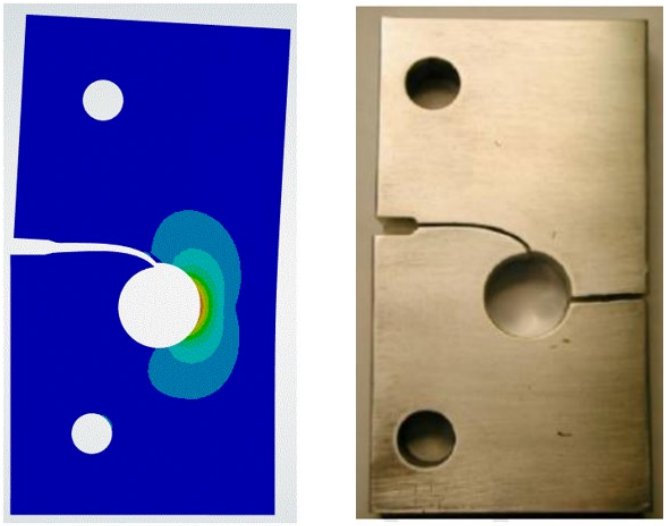
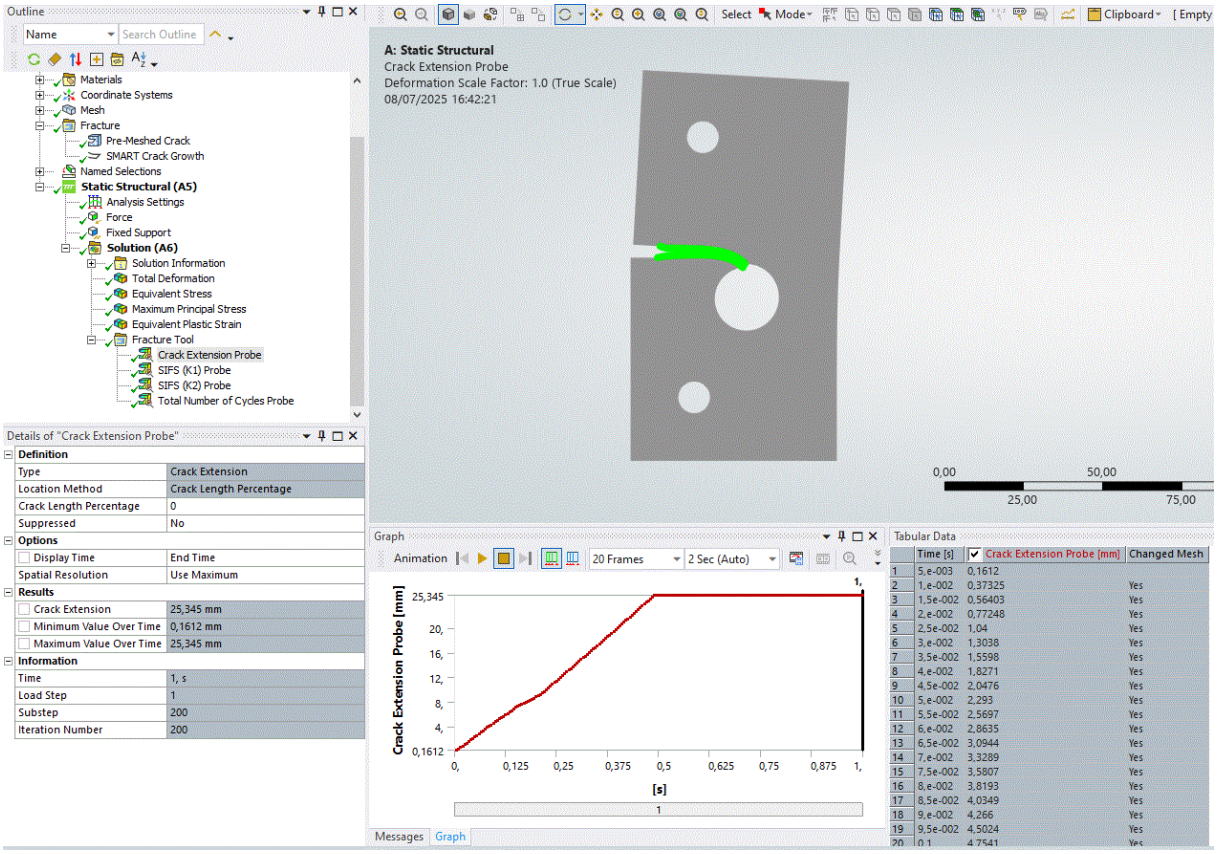


Figure : Comparaison de la trajectoire de propagation de fissure : (a) résultat numérique ; (b) observation expérimentale reproduite depuis [8].

La direction de propagation de la fissure peut être déterminée à l'aide de techniques de simulation, notamment en utilisant le logiciel ANSYS, tout en veillant à ce que les zones critiques de la structure ne soient pas dépassées.

La simulation a permis d'aborder différents aspects tels que l'influence de la position des perçages sur la trajectoire de la fissure, les facteurs d'intensité de contrainte en mode mixte, les durées de vie en fatigue ainsi que diverses distributions de contraintes. Selon l'emplacement initial de la fissure, la présence d'un trou dans la géométrie modifie son comportement en **déviant sa trajectoire** vers le trou. Dans certains cas, la fissure change de direction, traverse le trou, et poursuit sa propagation jusqu'à ce que l'effet du perçage disparaisse. L'évolution de la fissure montre d'abord une propagation rectiligne dominée par le mode I, suivie d'un changement de direction sous l'effet d'un KII négatif croissant, amenant la fissure à se courber vers l'ouverture (trou), révélant une interaction complexe entre les deux modes de chargement.

Les facteurs d'intensité de contrainte pour les deux modes de rupture, K_I (mode I) et K_{II} (mode II), peuvent être estimés à l'aide de cette méthode basée sur ANSYS. Elle permet également de prédire le nombre de cycles jusqu'à rupture ainsi que l'évolution de l'extension de la fissure.



V. Conclusion

La validation des résultats issus de la simulation de la propagation des fissures a été assurée par une **comparaison cohérente avec les résultats numériques de propagation de fissure obtenus dans ANSYS ainsi qu'avec les données expérimentales**. Les résultats obtenus

permettent de mettre en évidence les capacités du logiciel ANSYS dans la modélisation de phénomènes de fissuration, en particulier sous chargement en mode mixte.

L'outil S.M.A.R.T Fracture intégré à ANSYS Mechanical s'est révélé pertinent pour simuler de manière prédictive l'évolution d'une fissure et en suivre la trajectoire, notamment dans des structures comportant des discontinuités telles que des perçages.

Dans une approche plus globale, ANSYS offre une plateforme robuste permettant l'intégration d'analyses multiphysiques, combinant mécanique, thermique, dynamique explicite et évaluation de la durée de vie en fatigue (via nCode DesignLife). Cette combinaison permet d'envisager une démarche de conception tolérante aux dommages, particulièrement adaptée aux composants critiques tels que les disques, aubes ou carters dans les secteurs aéronautique et énergétique.

La méthodologie numérique ainsi mise en œuvre permet de localiser précisément les zones critiques, d'anticiper la propagation de fissures, et d'optimiser la durée de vie des structures tout en réduisant les sur-conservatismes. Elle constitue ainsi un levier stratégique pour améliorer la fiabilité des composants, optimiser les intervalles d'entretien et maîtriser les coûts de maintenance. Cette approche, bien que générique ici, souligne l'intérêt croissant des outils de simulation prédictive dans l'ingénierie industrielle moderne.

Références

[1] **Erdogan, F., & Sih, G. C.** (1963). *On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear*. **Journal of Basic Engineering**, **85**(4), 519–527

[2] **Bjørheim, F. Practical Comparison of Crack Meshing** in ANSYS Mechanical APDL 19.2. Master's Thesis, University of Stavanger, Stavanger, Norway, 2019.

[3]. ANSYS.Academic Research Mechanical, Release 19.2, Help System. In Coupled Field Analysis Guide, 2025; ANSYS, Inc.: Canons burg, PA, USA, 2020.

[4] **Paris, P., & Erdogan, F. (1963).** A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of Basic Engineering*, **85**(4), 528–534

[5] **Ambati, Marreddy · Gerasimov, Tymofiy · Lorenzis, Laura** A review on phase-field models of brittle fracture and a new fast hybrid formulation » Computational Mechanics, vo 55, N 2, 2015

[6] **Lewicki, D. G.** (2001). *Gear Crack Propagation Path Studies — Guidelines for Ultra-Safe Design* (NASA/TM-2001-211073; ARL-TR-2468). National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, and U.S. Army Research Laboratory, Cleveland, Ohio

[7] **Rice, J.R.** Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue. In Fatigue Crack Propagation; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 1967; pp. 247–309

[8] **Giner, E.; Sukumar, N.; Tarancón, J.E.; Fuenmayor, F.J**. An Abaqus implementation of the extended finite element method. Eng. Fract. Mech. 2009, 76, 347–368.