

LA FISSURE, UNE FACULTÉ À HAUT RISQUE DE LA MATIÈRE

Prédire la naissance et la propagation de fissures dans les matériaux est un enjeu majeur de sécurité : aviation, bâtiments, nucléaire... et jusque dans l'espace. **Nicolas Moës** explique comment la simulation numérique révolutionne ce domaine hautement sensible.

La matière peut se déformer mais elle peut aussi se fissurer. Dès le paléolithique, l'homme avait compris le bénéfice qu'il pouvait tirer de cette faculté de la matière pour concevoir une très grande variété d'outils tels que pointes de flèches, pointes de lances ou haches de pierre. Ces premières fissures conscientes de l'humanité n'ont cessé d'être de mieux en mieux maîtrisées, pour arriver de nos jours à des machines-outils extrêmement perfectionnées produisant non plus des éclats de pierre mais des copeaux de métal pour la mise en

MÉCANIQUE

Dans le cadre de notre partenariat avec l'Académie des sciences, les académiciens nouvellement élus fin 2019 présentent un éclairage sur leur discipline et ses enjeux scientifiques, éthiques, politiques et sociétaux, à travers leur expérience personnelle.

forme de pièces de géométrie de plus en plus précises malgré leur complexité géométrique grandissante.

Si une fissure rend des services, elle a sa part d'ombre. Un tremblement de terre est causé de manière schématique par le mouvement subit des deux faces d'une fissure (appelée plutôt faille dans ce contexte). Ce mouvement libre de l'énergie stockée qui se propage jusqu'à la surface. Les fissures aiment aussi voyager : rupture de caténaire, rupture de pont routier ou de pont pour la circulation de trains. Dans le domaine aérien, les ruptures peuvent avoir des effets catastrophiques ou des fins heureuses comme l'amerrissage en urgence d'un Airbus A320 sur le fleuve Hudson, en face de Manhattan, par le pilote Sully Sullenberger à la suite de l'arrêt des deux moteurs dû à des ruptures de différentes pièces par l'ingestion d'oies sauvages.

La fissure s'imisce aussi dans notre vie quotidienne, que ce soit en cuisine (trancher, hacher, couper, détailler, débiter, émincer, émietter...), au jardin (faucher, tondre, tailler, étêter, élaguer, tronçonner, arracher...) et de la cave au grenier (scier, sectionner, meuler...). Notre vie intime n'est pas non plus à l'abri de ruptures amoureuses.

RÉSISTANCE OU TÉNACITÉ, IL FAUT CHOISIR

Alors que la mécanique du mouvement des objets a été établie dans les « Principia Mathematica » de Newton il y a près de trois cent cinquante ans, en donnant une relation entre force, masse et accélération, la mécanique de la fissuration n'a que cent ans (avec les travaux de l'ingénieur britannique Griffith en 1920). Ce délai entre les deux théories s'explique par le fait que la fissure n'est pas un objet en mouvement mais un phénomène en mouvement ! On parle aussi de mouvement immatériel ou configurationnel. Tout comme une pomme qui tombe est soumise à une force, une fissure ne peut avancer que si elle est poussée par une force. Mais cette dernière force est d'une nature différente de celle à laquelle est soumise la pomme. De plus, une pointe de fissure n'a pas de masse (ce qui la rend dangereuse car il n'y a pas d'inertie à vaincre pour la mettre en mouvement). La fissure n'est pas le seul phénomène de mouvement sans déplacement de masse. Un front de solidification qui congèle un glaçon depuis son extérieur vers son intérieur avance à une certaine vitesse sans que le glaçon se déplace. De même, un feu ravageant une forêt migre à travers celle-ci, laissant des arbres carbonisés en place.



PROFIL

Professeur à l'École centrale de Nantes et membre du GeM (Institut de recherche en génie civil et mécanique), **Nicolas Moës** est membre de l'Académie des sciences et de l'Institut universitaire de France. Spécialiste de la simulation numérique de la fissuration, ses travaux pionniers sont au cœur de la sécurité des installations et des transports.

Mais revenons à notre fissure. Compte tenu de leur danger, pourquoi les objets façonnés par l'homme sont-ils fissurables ? Ne serait-il pas possible de se débarrasser une bonne fois pour toutes de ces risques ? Voilà un bel objectif mais qui n'a pas été atteint à ce jour et il y a plusieurs raisons à cela, qui sont liées au matériau. Prenons une barre de Carambar qui sort du frigo. Elle se déforme peu lorsque l'on pousse dessus (elle est résistante), mais on peut facilement la casser en deux (elle est peu tenace). A contrario, la barre de Carambar laissée dans un véhicule au soleil se déformera facilement au toucher (elle est peu résistante), mais ne risque plus d'être cassée en deux (elle est très tenace). Être résistant ou être tenace, il faut malheureusement choisir. Un bon niveau de résistance est nécessaire pour garder à l'objet sa forme à l'usage (qui voudrait monter dans un avion qui se courbe lors de la montée des passagers ?), mais ce souhait s'accompagne d'une ténacité plus faible. Certes, à l'instar des matériaux composites, des progrès sur les matériaux sont sans cesse réalisés pour concilier au maximum résistance et ténacité (voire légèreté !), mais la pos-

sibilité de fissure ne peut être complètement évitée.

L'apparition de fissures n'est pas due seulement à la limitation du matériau mais également à l'agressivité du chargement extérieur. On peut distinguer trois types de chargements : statique (une plateforme ou un plancher peut s'écrouler si la charge accumulée devient trop importante), dynamique (déclenchement d'une instabilité ou effets d'une explosion), et, enfin, de fatigue (charge répétée). Le chargement de fatigue apparaît par exemple sur les pièces mécaniques dans les avions qui sont soumis à des cycles de chargement (atterrissage-vol-atterrissage). Il est particulièrement pernicieux car il est capable de transformer des défauts au sein de la matière (non détectables à la fabrication) en fissure après un certain nombre de cycles, pouvant aller jusqu'à plusieurs millions.

Si le chargement est vraiment faible, le nombre de cycles s'approchera de l'infini (on parle de limite d'endurance) et si, par contre, le chargement est très important, peu de cycles seront nécessaires pour atteindre la rupture. Un compromis est à trouver. On peut théoriquement construire un avion dont aucune des pièces ne se fissurerait en les rendant suffisamment massives, mais l'avion ne pourrait décoller tellement il serait lourd, ou alors cela impliquerait une consommation de carburant bien trop importante et pas du tout en phase avec l'époque.

UTILE AU PRÉVISIONNEL DE MAINTENANCE

On aura donc compris que, dans les constructions humaines soumises à des charges répétées, malgré tout le soin apporté dans le choix des matériaux et du design géométrique, des fissures vont apparaître. Il va donc falloir être tolérant mais jusqu'à un certain point. Cet état de fait porte un nom : la tolérance aux dommages. On tolère que de petites fissures apparaissent mais on n'accepte pas que ces fissures deviennent trop grandes et mettent en cause la sécurité. Il faut donc inspecter et prendre des décisions, c'est ce qu'on appelle les opérations de maintenance. Un point critique concerne le bon délai entre deux maintenances. Un plus grand espacement des maintenances dans le temps est intéressant économiquement, mais il ne doit pas remettre en cause la sécurité. La simulation numérique est un outil précieux qui aide à la décision pour le prévisionnel de maintenance. À l'aide de calculs par ordinateur, on peut prévoir le nombre de cycles de chargement nécessaires pour qu'un défaut non détectable à la fabrication devienne une fissure détectable. On peut de même calculer le nombre de cycles nécessaires pour qu'une fissure détectable atteigne une taille critique au-delà de laquelle la fissure se propage d'un coup sans s'arrêter (propagation dite instable).)))

Dans toute construction humaine soumise à des charges répétées, des fissures vont apparaître. Il va donc falloir être tolérant mais jusqu'à un certain point: on parle de la tolérance aux dommages.

La simulation permet aussi de remonter aux causes probables d'un incident pour déceler si le phénomène de fissuration est isolé et déterminer si toute une flotte d'avions doit rester au sol.

» Ces deux calculs sont différents et le second est plus simple que le premier. Le second est un problème de propagation de fissure dans lequel on part d'une fissure existante qui a une certaine géométrie et dont le front va petit à petit se propager à la suite de l'application cycle après cycle du chargement. Le premier calcul, plus difficile, est un problème dit d'initiation. Les questions sont : où va naître la fissure, quand et sous quelle géométrie (orientation) ? Pour l'initiation, deux écoles de pensée complémentaires cohabitent. La première, prépondérante, cherche des formules théoriques explicites (reposant sur des observations expérimentales sur pièces de géométrie simple) donnant les conditions d'apparition d'une fissure de taille donnée à un endroit donné. La seconde repose sur de la simulation numérique haute fidélité qui calcule pas à pas la détérioration (endommagement) de la matière pour aboutir in fine à des lèvres de fissure se séparant. L'intérêt de l'approche numérique est de permettre la prise en compte de la géométrie exacte de la structure étudiée.

La maintenance n'est pas le seul domaine d'intérêt pour la simulation numérique de la propagation des fissures. La simulation permet également de remonter aux causes probables d'un incident en service pour

déceler si c'est un événement isolé et déterminer si toute une flotte d'avions doit être clouée au sol, si un type de cabines de téléphérique doit être revu, etc.

Concernant le chargement dynamique, la simulation n'est pas non plus en reste, mais la tâche est ardue. Prenons l'exemple des parois blindées transparentes (verres blindés par feuilletage). Même si elles vont se fissurer, il est important qu'elles ne puissent pas être traversées. L'enjeu est de réaliser les parois les plus légères possible (surtout si elles équipent un véhicule) tout en gardant l'assurance d'une non-pénétration. De nombreux essais (coûteux) peuvent être réalisés. La simulation devrait permettre de limiter le nombre de ces essais pour ne retenir que les combinaisons d'épaisseurs intéressantes. Ces calculs restent très difficiles à réaliser car ils prennent beaucoup de temps et leur réalisme reste à être vérifié.

Nous avons ouvert cette tribune au paléolithique et nous la refermerons dans l'espace, où les fissures ont trouvé un nouveau terrain de jeu. Le 23 avril 2021, le « Crew Dragon » qui embarquait Thomas Pesquet et ses trois collègues astronautes vers la Station spatiale internationale a évité une collision avec un débris spatial. Les débris spatiaux se multiplient en orbite terrestre basse par l'envoi d'engins de plus en plus nombreux, mais également par la fragmentation de ces engins à la suite de collisions entre eux. La simulation numérique de ces fragmentations devrait permettre de mieux cartographier les risques pour le futur de la conquête spatiale. ★

Le site de l'Académie des sciences : WWW.ACADEMIE-SCIENCES.FR

« Les frontières immatérielles, une belle opportunité pour la mécanique numérique des solides », intervention de Nicolas Moës à la conférence-débat « Les simulations "frontières" en mécanique des solides et des fluides » de l'Académie des sciences, 9 mai 2017. À visionner sur : <https://www.youtube.com/watch?v=oxamFaCPv7o>



Réaliser des parois de verre blindé légères nécessite quantité d'essais, très coûteux. L'approche numérique devrait permettre d'en limiter le nombre de façon considérable.