

ENDOMMAGEMENTS ET RUPTURE DE MATÉRIAUX

Dominique FRANÇOIS

Notes de lecture

par Philippe PASQUET, GDTech France, groupe SAMTECH

La compréhension des phénomènes d'endommagement est une nécessité absolue si l'on veut que les simulations puissent nous aider à prédire les situations futures. Mais nous prêchons pour notre propre chapelle, il y a beaucoup plus important. Si l'on veut placer très haut la barre susceptible de montrer l'importance de telles considérations, il faut suivre Dominique François qui attire notre attention sur la catastrophe du TITANIC qui n'aurait pas eu les mêmes conséquences dramatiques si elle avait eu lieu de nos jours. L'explication se trouve page 130 de la monographie qu'il vient de publier, en 2004, chez EDP Sciences.

Endommagements et rupture de matériaux se situe dans la lignée de plusieurs ouvrages sur les matériaux qui ont donné lieu à des notes de lecture. Ils avaient cependant un objet plus large, même s'ils contenaient tous un chapitre sur la mécanique de l'endommagement. Ici, D. François, déjà co-auteur de l'un d'entre eux¹, a choisi de concentrer le sujet sur les comportements ultimes. Privilège de la retraite : celle-ci lui a tout à la fois permis de prendre du recul et donné l'occasion de rassembler les fruits de son expérience. Alors, profitons-en !

Avant toute chose, il s'agit de définir l'endommagement. C'est ce que nous pensions en ouvrant le livre, mais l'auteur freine nos ardeurs en nous proposant de définir ... le matériau. Donc, le matériau est la superposition de la matière et de l'ouvrage humain. Ces opérations humaines vont conférer structures et propriétés – et, par conséquent, performances dont la résistance à l'endommagement – à ces matériaux. Ces endommagements (notons le pluriel du titre de l'ouvrage) ont plusieurs origines : le clivage (cas des aciers ferritiques) qui peut rester bloqué ou au contraire se propager ; la cavitation (cas des aciers austénitiques), qui apparaît dans les matériaux ductiles ; la fatigue, qui survient sous l'effet des charges cycliques (primaires, thermiques ou roulement) ; la corrosion sous contraintes, combinaison d'une sollicitation mécanique et d'une agression chimique ; le fluage, qui apparaît à haute température même quand la sollicitation est constante. Ce premier chapitre nous ayant déjà appris beaucoup de choses – par exemple que les combinaisons d'endommagements peuvent aussi exister avec un effet d'amplification (le tout est supérieur à la somme des parties) – nous sommes invités à entrer dans les détails.

Le chapitre suivant est consacré au rôle des hétérogénéités dans l'apparition des endommagements. On y trouve une méthode de calcul de la contrainte théorique de rupture en fonction de la distance interatomique et de l'énergie de séparation. Le désordre et les défauts expliquent la différence entre cette valeur théorique et la valeur réelle. Après quelques éléments sur la mécanique de la rupture (approche globale), l'auteur introduit l'approche locale qui découle de la

¹ D. François, A. Pineau et A. Zaoui : *Comportement mécanique des matériaux* (2 volumes aux éditions Hermès) - Note de lecture parue dans le volume XIX-2 distribué le 20/06/1995.

théorie du maillon le plus faible : la loi de Weibull fait apparaître une contrainte de rupture et un exposant pour en déduire une distribution statistique des contraintes de clivages.

Le troisième chapitre nous fait entrer de plain-pied dans la mécanique de l'endommagement. Initiée par l'école russe, elle s'est développée pour les applications de fluage des métaux et a été généralisée pour toutes autres sortes de matériaux au travers du formalisme thermodynamique bien connu, à défaut d'être toujours bien compris. Cette théorie à caractère global considère que le matériau endommagé devient poreux et lui confère un module d'Young plus petit que celui du matériau sain. Une analyse plus fine montre que cette théorie est incompatible avec les relations d'homogénéisation. Il faut faire appel aux théories de Gurson et ses améliorations qui font intervenir une notion importante : le taux de triaxialité pour suivre l'évolution de la porosité au cours de la déformation.

Le chapitre suivant aborde les problèmes de corrosion sous contraintes et, plus généralement, la combinaison des effets de l'environnement avec une sollicitation extérieure, ce qui exclut du champ d'investigation les effets de l'oxydation. L'élément le plus néfaste semble être l'hydrogène à cause de sa petite taille atomique et des mécanismes de dégradation qu'il engendre. Après la pénétration, il faut invoquer le pouvoir de diffusion : la vitesse est encore plus rapide dans les ferritiques que dans les austénitiques. Ensuite, il se laisse facilement piéger et conduit à divers mécanismes d'endommagement par pression ou réaction chimique. Ces phénomènes, parmi d'autres, conduisent à la corrosion sous contraintes : l'action simultanée de la mécanique et de la chimie entraîne des contraintes de traction qui peuvent être bloquées par des précontraintes de compression. Bien entendu, les phénomènes de corrosion ont tendance à augmenter la vitesse de propagation des fissures au même titre que la fréquence des sollicitations.

Le cinquième chapitre dresse un panorama historique des recherches en fatigue. De l'industrie ferroviaire à l'industrie électronucléaire, chaque domaine a contribué dans la mesure de ses besoins. De Wohler et ses premières études sur la fatigue au milieu du XIX^{ème} siècle, qui montre que la durée de vie est inversement proportionnelle à l'amplitude de la sollicitation, à Rice qui montre que l'intégrale J est indépendante du contour et à l'approche locale développée en France par le groupe Beremin² qui permet de relier la dureté et la ténacité, la connaissance des phénomènes d'endommagement a aujourd'hui atteint un niveau tel que tout accident paraît prévisible. Et pourtant, si l'on suit l'auteur, le coût des ruptures est encore du 4% du PIB dans les pays industrialisés. D'importantes économies (d'argent, de vies, ...) sont donc encore possibles. C'est le domaine de l'estimation de la durée de vie et de la maintenance.

En ce qui concerne la durée de vie, on est face à des lois générales censées décrire des phénomènes où interviennent de nombreux paramètres. Sont passées en revue plusieurs situations desquelles il ressort que la propagation des fissures est plus facilement abordable que l'amorçage (encore faut-il distinguer fissures longues et fissures courtes, fissures de fatigue et fissures de fluage) et que, dans certains cas (corrosion sous contraintes), mieux vaut prévenir que guérir. Au passage, D. François souligne l'intérêt des simulations numériques permettant de mieux évaluer les concentrations de contraintes.

Le domaine de la maintenance fait l'objet du septième chapitre. L'auteur examine quelques moyens de contrôle non destructif et leur domaine de validité. Sont ainsi décrits : les moyens visuels qu'il ne faut pas négliger car, si la probabilité de détecter une fissure "*est faible*", elle peut être améliorée par des techniques de resuage, ce qui n'en augmente guère le coût par

² Du nom d'une équipe de l'Ecole des Mines qui utilisait un code de calcul nommé TITUS (aujourd'hui SYSTUS). Voir les tragédies de Corneille (Tite et Bérénice) et de Racine (Bérénice) écrites toutes deux en 1670.

rapport aux autres méthodes beaucoup plus sophistiquées telles que magnétoscopie, radiographies, techniques acoustiques ou ultrasonores. La précision de tous les moyens utilisant le rayonnement dépend plus ou moins directement des longueurs d'ondes émises. Ce chapitre, très pratique, s'achève par la description du cas d'un ouvrage d'art que l'on suppose métallique pour rester dans la tonalité du contenu.

Le huitième chapitre "*très court faute d'exemples*" pose le problème de la guérison spontanée des endommagements. Les cas de réparation sont plus courants : couture, collage, agrafage ou perçage, ... autant de techniques que l'on retrouve dans l'aéronautique ou dans le génie civil. Certains matériaux : résines, polymères, verres, bétons, peuvent dans certaines conditions présenter des propriétés plus ou moins auto-cicatrisantes : il semble naturel qu'elles soient dues à des réactions chimiques au niveau des molécules ou des atomes. Il existe dans ce domaine un vaste champ de recherche, de quoi compléter un futur chapitre !

Le dernier chapitre présente une approche philosophique tendant à déterminer les conditions qui feraient apparaître l'endommagement comme une branche à part entière des sciences de l'ingénieur : démarche intéressante de "Popperisation" de la science de l'endommagement, surtout quand elle est mise en perspective avec la longue expérience pratique de l'auteur.

Ce livre n'est pas réellement un support d'enseignement, qui exigerait une rédaction plus linéaire et plus progressive. Mais telle n'était pas l'ambition de D. François, qui a mis beaucoup de lui-même dans cet ouvrage écrit à la première personne en y incluant quelques considérations subjectives sur les liens entre endommagement et développement durable. Nous sommes en présence d'une véritable somme sur l'endommagement et seuls les étudiants curieux et exigeants sauront profiter pleinement de sa lecture. Les ingénieurs, quant à eux – qu'ils soient métallurgistes ou calculateurs – sont la cible idéale de cet ouvrage qui leur fournira une base de langage commun. Les enseignants en matériaux sauront, pour leur part, naturellement en tirer de nombreuses idées et de nombreux exemples enfin rassemblés ici par écrit.

