

Préface de Franz-Josef Ulm

Depuis la création de la mécanique des matériaux en tant que discipline de base du génie civil, le concept d'endommagement est au centre des préoccupations de l'ingénierie. Toujours présente dans la conscience des ingénieurs est la crainte de la défaillance insidieuse des matériaux et des structures construits dans des environnements de plus en plus difficiles et susceptibles d'affecter la durabilité de nos infrastructures et le bien-être de nos sociétés. Mais, lorsque l'endommagement est rationalisé et mis en œuvre sous la forme de modèles mécaniques pour l'ingénierie, celui-ci devient un outil scientifique permettant aux ingénieurs de quantifier, de prédire et d'éviter la détérioration et la défaillance prématurées des matériaux et des structures. Ce puissant message est au cœur de ce manuel consacré à la mécanique de l'endommagement du béton et des structures en béton.

La mécanique de l'endommagement condense les processus de fissuration discrète en un observable appréhendable : la dégradation de la rigidité élastique. Rattachés à la mécanique des milieux continus, ces processus de détérioration sont correctement décrits quand ils s'inscrivent dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles. C'est le point de départ de ce voyage intellectuel que nous proposent les auteurs. Il s'appuie sur la découverte révolutionnaire de Jacky Mazars au début des années 1980, selon laquelle la description de la détérioration du béton sous charge doit rompre avec le dogme des méthodes basées exclusivement sur des concepts de résistance qui dominait la mécanique du béton à l'époque. Ceci a été fait en rationalisant les approches pour la description de la fissuration du béton en se basant sur la déformation et dans le cadre plus large de la mécanique de l'endommagement en respect de la thermodynamique. Après plus de trois décennies de recherche en science pour l'ingénieur, les fruits de l'effort de Jacky Mazars sont maintenant entre nos mains sous la forme d'une puissante boîte à outils à destination de l'ingénierie que ce manuel nous ouvre.

Dès le départ, la mécanique de l'endommagement pour le béton de Mazars part du principe que le choix d'un concept approprié pour décrire les dommages doit être à la fois ancré dans des principes fondamentaux et appréhendable par les ingénieurs. Un choix astucieux est de lier les dommages à la valeur propre positive du tenseur des déformations, car tous les ingénieurs reconnaissent immédiatement la menace potentielle des tensions vis-à-vis de la fissuration. Mais lorsqu'elle est dérivée de principes fondamentaux, cette quantité est facilement exprimable en termes de contrepartie continue du taux de restitution d'énergie utilisée en mécanique de la rupture. Désormais, il devient possible de relier les principes fondamentaux aux observations expérimentales, telles que les courbes de contrainte-déformation, et de traduire ces observations en lois d'évolution thermodynamique des endommagements pour diverses situations de charge pertinentes : monotone, cyclique, dynamique, avec confinement, etc.

Le deuxième pilier de la mécanique de l'endommagement de Mazars et de ses collaborateurs est son implémentation dans les processus de calculs qui est une condition *sine qua non* pour que le concept soit adopté par les ingénieurs. En tant que théorie du continuum, la mécanique de l'endommagement n'a pas d'échelle de longueur intrinsèque. Cependant, lorsqu'elle est considérée de manière cohérente comme une représentation globale du champ moyen d'un processus de fracturation surfacique, une échelle de longueur est facilement dérivée et doit être prise en compte dans la mise en œuvre informatique. Le résultat, connu sous le nom de théorie de l'endommagement non local, atteint précisément cet objectif : garantir une bonne réalisation par éléments finis de cette mécanique avec des paramètres de modèle d'une signification physique claire et accessible par des tests d'ingénierie (presque) standards.

Le test discriminant pour tous les modèles de mécanique de l'ingénierie est leur application à un large éventail de problèmes auxquels les ingénieurs doivent faire face aujourd'hui. Ceux-ci vont des solutions classiques de conception des ouvrages en béton à la conception parasismique, en passant par la prise en compte des effets de vitesse ou le risque de dommages du béton au jeune âge causé par la concurrence de la maturation (provoquant un durcissement) et le développement des contraintes thermiques et chimiques. La démonstration étant faite que ces applications sont traitables conduit à affirmer que la mécanique de l'endommagement de Mazars est d'un impact significatif sur l'ingénierie.

Plus généralement, alors que les périls du réchauffement climatique nous obligent, nous les ingénieurs, à penser à l'avenir et à concevoir des structures non seulement pour leur résistance, mais aussi pour leur durabilité et leur résilience au quotidien et lors d'événements extrêmes, ce livre arrive à point nommé. Élaboré par deux éminents éducateurs et ingénieurs scientifiques du domaine, il présente de manière pédagogique et précise, tant pour les enseignants que pour les étudiants, les éléments clés de la mécanique

de l'endommagement du béton et des structures en béton, et place sans conteste cette science au cœur de l'enseignement contemporain de la mécanique des matériaux en génie civil.

Franz-Josef ULM
Professeur en ingénierie civile et environnementale
Massachusetts Institute of Technology
US National Academy of Engineering

Préface de Pierre Labbé

Certains événements, comme la ruine tragique du viaduc du Polcevera à Gênes, révèlent au grand public et rappellent périodiquement aux ingénieurs et hommes de science l'enjeu considérable, sociétal et économique associé à l'endommagement des structures en béton. Dans ce contexte, parmi les multiples maladies qui peuvent affecter le béton, la fissuration est certainement celle qui a le plus mobilisé les connaissances et le savoir-faire des ingénieurs, puisque, dès le déploiement du concept d'état limite dans les pratiques d'ingénierie, on trouve des formules d'espacement et d'ouverture de fissures dans les règles françaises dites BAEL 68.

Dans un passé encore récent, les connaissances scientifiques et techniques liées à la durée de vie des ouvrages ont été traditionnellement moins investies que celles qui président à la conception et à la construction et regardées comme moins prestigieuses. Il faut dire qu'on n'invite pas la presse pour inaugurer un chantier de maintenance ! Les choses sont heureusement en train d'évoluer sous l'effet des préoccupations environnementales et de l'intérêt croissant porté à la durabilité des ouvrages et la conservation du patrimoine.

L'ouvrage que nous livrent Jacky Mazars et Stéphane Grange s'inscrit donc tout à fait dans les problématiques qui seront au cœur du métier des générations montantes d'ingénieurs en génie civil. Cet ouvrage est le reflet de la personnalité des auteurs qui ont en commun d'être des scientifiques chevronnés, attachés au développement et au progrès des sciences de l'ingénieur mais aussi des praticiens attentifs à leur mise en œuvre opérationnelle par les bureaux d'études. Il en résulte que l'ouvrage pourra être lu avec profit, portant leur attention sur telle ou telle partie, aussi bien par des chercheurs que par des ingénieurs désireux de parfaire leur connaissance de la physique de la fissuration des ouvrages en béton et de sa modélisation.

Scientifiques et chercheurs, Jacky Mazars et Stéphane Grange le sont par exemple dans le soin apporté au développement d'un cadre théorique adapté à la formulation de leur modèle dans le milieu continu à trois dimensions ou dans l'exposé des fondements des lois de comportement qu'ils développent et utilisent, en veillant attentivement à leur compatibilité avec les grands principes de la thermodynamique. Scientifiques ils le sont aussi dans le spectre des situations pour lesquelles ils interrogent l'apparition et le développement des fissures. C'est ainsi qu'ils portent leur attention sur le comportement du béton au jeune âge, dont on comprend aujourd'hui de mieux en mieux le rôle crucial qu'il peut jouer dans l'apparition de fissures à la maturité des matériaux et des ouvrages. Ils regardent avec la même acuité, sans doute avec la même passion, les phénomènes très lents du fluage et ceux de la dynamique rapide et montrent que les modèles qu'ils proposent s'adaptent à ces différentes situations.

À côté des développements ardues que nécessite l'exposé de leur démarche scientifique, et en y apportant le même soin qui sera apprécié par les ingénieurs, Jacky Mazars et Stéphane Grange nous présentent la mise en œuvre pratique des modèles qu'ils proposent. Sous son apparente banalité, le sous-titre, « de la théorie à la pratique », aura rarement été plus pertinent que dans le cas présent. Saluons tout particulièrement ici les efforts de simplification que les auteurs ont apportés à leur démarche initiale en retenant un modèle à endommagement isotrope sous charge monotone qu'ils ont ensuite étendu aux situations cycliques. Notons aussi qu'ils manipulent avec aisance des outils chers aux ingénieurs, comme le modèle de poutre de Timoshenko. Même si les modèles de comportement qu'ils présentent nécessitent évidemment plus de paramètres que ce à quoi les ingénieurs sont habitués, les auteurs ont mis un point d'honneur à ce que le calage de ces paramètres soit possible à partir d'essais de laboratoire classiques. Ils fournissent même les valeurs numériques que l'on peut adopter par défaut et sont allés jusqu'à s'assurer de la mise en œuvre dans un logiciel aux éléments finis pour des situations industrielles nécessitant de gros maillages, comme dans l'exemple présenté d'une maquette d'enceinte de confinement.

Pour finir sur une note plus personnelle, je voudrais ajouter qu'après avoir partagé avec Jacky Mazars plusieurs aventures de recherche passionnantes, allant des essais sur table vibrante du programme CAMUS jusqu'au projet national CEOS.fr en passant par les essais SAFE, SMART, VeRCoRs, convoqués dans cet ouvrage, je pense être le porte-parole d'une large communauté en disant que j'ai toujours apprécié sa hauteur de vue, sa rigueur scientifique et intellectuelle et son inébranlable probité. Après qu'il a formé de nombreux ingénieurs et scientifiques, dont Stéphane Grange, je ne doute pas que les

nouvelles générations trouveront aussi matière à se bien former à la lecture de cet ouvrage.

Pierre LABBÉ
Professeur à l'École spéciale des travaux publics (ESTP)
Ancien *Corporate Expert* du Groupe EDF
en génie civil et risques sismiques
Président d'honneur de l'Association française
du génie parasismique (AFPS)

Introduction

Chaque année, il s'utilise dans le monde presque autant de mètres-cube de béton qu'il y a d'habitants sur la planète. C'est de loin le matériau le plus employé notamment pour construire toutes sortes de bâtiments et d'infrastructures. Dans un monde où le développement durable est devenu un sujet incontournable, où l'accroissement de la population mondiale et les conséquences du changement climatique constituent d'énormes défis pour les générations futures, les ingénieurs et les chercheurs du génie civil ont le devoir et la responsabilité d'assurer la durabilité et la sécurité de l'ensemble de ces constructions.

Schématiquement, on peut dire que les dégradations des constructions sont en relation :

- avec le vieillissement des matériaux sous l'effet du temps, des variations climatiques et/ou sous l'effet d'un environnement « agressif » ;
- avec la répétition des charges importantes et les effets de chargements excessifs dus à des causes accidentelles (risques naturels ou technologiques), voire intentionnelles (attentats).

Avoir un bon contrôle de ces différents aspects nécessite à la fois une bonne maîtrise de la conception des ouvrages, de la fabrication du matériau et une connaissance approfondie de la façon dont les matériaux et les structures réagissent en cas d'agression. Ces « agressions » se traduisent dans tous les cas par des fissurations plus ou moins intenses, qui elles-mêmes deviennent le vecteur d'agressions environnementales (par l'eau ou certains produits corrosifs).

L'appréhension de la fissuration, initialement abordée par des concepts empiriques, puis par la mécanique de la rupture, a vu lors des quatre dernières décennies l'éclosion

d'approches liées au concept d'endommagement pour décrire la dégradation par fissuration du béton. L'usage de ce concept et le développement d'outils d'observation à petite échelle des phénomènes qui les sous-tendent, ont conduit à développer des modèles de comportement qui sont maintenant largement utilisés dans les mondes de l'université et de l'entreprise.

Les auteurs de cet ouvrage ont effectué de nombreuses recherches sur ces sujets et leurs idées et contributions ont été sollicitées par le secteur de la construction pour des préoccupations notamment liées :

- aux grands ouvrages producteurs d'énergie, notamment les barrages et les centrales ;
- aux analyses pré et post sismiques en France, au Japon ou dans le cadre de l'élaboration des codes de construction européens ;
- aux innovations de conception et d'analyse des bâtiments et ouvrages d'art, visant notamment à une meilleure maîtrise des marges de sécurité.

Dans ce contexte, ils estiment que le savoir-faire et les développements acquis permettent de proposer une présentation à la fois complète et synthétique des travaux réalisés, en montrant qu'ils sont suffisamment aboutis pour un passage vers l'ingénierie.

Ainsi, les chapitres qui suivent visent à permettre à ceux qui sont en formation ou en apprentissage, que ce soit en recherche ou en ingénierat, ou même comme opérationnel de l'ingénierie, de trouver dans cet ouvrage les fondements, les outils et les applications que les travaux réalisés par les auteurs sur l'endommagement des structures en béton permettent. Cet ouvrage se démarque volontairement d'autres plus complets qui, reprenant plus largement les travaux internationaux sur le domaine, font office de recueil de savoir-faire sur le sujet mais exigent du lecteur une culture d'expert et un lourd travail d'assimilation.

L'idée a été ici de faire un ouvrage peu volumineux, le plus possible autosuffisant (ont été placés en annexe les prérequis nécessaires en mécanique des solides et sur la numérisation par éléments finis), quelques exercices d'entraînement sont également proposés et une large variété d'applications sont données pour permettre à celui qui doit « faire » d'être guidé dans ses travaux. Aussi, il n'est pas nécessaire de pratiquer une lecture linéaire de l'ouvrage ; il est conseillé au lecteur de s'imprégner d'abord du sommaire et d'aller chercher ensuite les chapitres qui se rapprochent le plus de ses besoins.

Le sous-titre de l'ouvrage « de la théorie à la pratique » indique que les modélisations établies l'ont été dans un cadre respectant les grands principes de la thermodynamique des processus irréversibles (chapitres 2 et 3) et sont implémentées en satisfaisant au

mieux l'état de l'art sur les procédures numériques actuelles (chapitres 4 et 5), mais avec un objectif toujours présent : « faire au plus simple tout en visant la performance », le chapitre 8 en étant un bon exemple. Les chapitres 5, 6, 7 et 8 décrivent précisément la façon d'aborder une grande variété d'applications, tels le comportement cyclique et la réponse sismique des ouvrages, la description des situations de dynamique rapide (chocs notamment), ou encore les effets dus à la maturation du béton au jeune âge dans les structures massives. Le chapitre 9 est un recueil d'exercices et de compléments pour parfaire la pratique des modèles présentés. Enfin, une bibliographie couvrant l'ensemble du domaine permet à ceux qui le souhaitent d'approfondir certains sujets traités.