

# Avant-propos

Jacques BESSON<sup>1</sup>, Frédéric LEBON<sup>2</sup> et Éric LORENTZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CNRS, Mines Paris PSL, Paris, France

<sup>2</sup> LMA, Aix-Marseille Université, Marseille, France

<sup>3</sup> EDF Lab Paris-Saclay, EDF R&D/ERMES, Palaiseau, France

Depuis maintenant une quarantaine d'années, la simulation numérique s'est imposée pour étudier le comportement des structures, de la conception jusqu'aux analyses en fonctionnement, et ce dans de nombreux domaines industriels (bâtiment, transport, énergie, manufacture, etc.). En accompagnement des progrès de la physique des matériaux et de l'informatique, elle permet une description toujours plus proche de la réalité. Pour autant, deux phénomènes soulèvent des difficultés numériques suffisamment sévères pour rester, à ce jour, le sujet de nombreux travaux de recherche : il s'agit des problématiques de contact/frottement, d'une part, et d'endommagement, d'autre part. C'est d'autant plus critique que ces mécanismes sont bien souvent impliqués dans la réponse d'une pièce aux sollicitations extérieures. Et faute de solutions numériques robustes, l'ingénieur d'étude pourra être amené à les négliger – ou tout au moins à les approcher de manière grossière – au risque d'une perte de fiabilité de la simulation, ce qui impose à son tour de prendre davantage de marges d'erreur, avec généralement un impact sur les coûts économiques et écologiques.

Bien que distincts sur le plan physique, les phénomènes de contact/frottement et d'endommagement entraînent tous deux une forte non-linéarité du problème mécanique. En effet, ils se caractérisent par un comportement à seuil (décollement/contact ; élasticité/dommage) qui limite la régularité du problème, dorénavant non différentiable (*non smooth mechanics*). En outre, cette perte de régularité a l'inconvénient de porter sur les variables principales du problème (déplacement, vitesse, endommagement), avec deux

conséquences directes : d'une part, les caractéristiques mathématiques du problème s'écartent des formes bien maîtrisées et requièrent notamment des schémas de discrétisation innovants ; et d'autre part, la faible régularité subsiste à l'échelle des degrés de liberté du problème discrétisé, ce qui complique singulièrement la résolution robuste et performante des systèmes algébriques de grande taille correspondants. Par ailleurs, ni l'unicité, ni même l'existence de solutions ne restent assurées, ce qui se traduit par des points de bifurcation, des charges limites et des instabilités structurelles, toujours délicats à franchir sur le plan numérique. Enfin, le couplage de ces phénomènes avec d'autres non-linéarités telles que la plasticité ou les grandes déformations fragilisent encore plus l'ensemble de l'édifice numérique.

Dans le registre des couplages, les phénomènes de contact/frottement et d'endommagement interagissent également entre eux. En effet, l'endommagement se traduit au stade ultime par l'apparition de fissures macroscopiques. Il convient alors de résoudre le problème de contact/frottement entre les lèvres de ces dernières. C'est aussi le cas à l'échelle microscopique, où l'endommagement peut s'interpréter – suivant les matériaux – comme un réseau de microfissures ou encore une décohésion entre particules et matrice : les conditions de contact/frottement ont alors un impact direct sur la forme du modèle d'endommagement, en particulier sa réponse unilatérale selon que les microfissures s'ouvrent ou se ferment. Enfin, certaines modélisations d'endommagement cherchent à concentrer les phénomènes de dégradation sur des surfaces plutôt que de les répartir dans le volume ; on parle alors de modèles cohésifs dont la forme s'apparente fortement à celle des lois de contact/frottement. Si l'on ajoute à cela le fait que les conditions de chargement et de liaison des pièces mécaniques relèvent généralement d'un mécanisme de contact/frottement, c'est donc bien souvent l'ensemble des non-linéarités du problème qui peuvent intervenir simultanément, au prix d'une complexité numérique accrue.

Parmi l'arsenal numérique mobilisé pour traiter ces problèmes, on peut mentionner dès à présent quelques-unes des thématiques qui seront examinées dans cet ouvrage :

- des alternatives à la traditionnelle méthode de Newton, mieux adaptée aux problèmes réguliers ;
- des méthodes de résolution pour problèmes non symétriques qui résultent du caractère potentiellement non associé des lois d'endommagement et de frottement ;
- des méthodes de continuation pour franchir les points critiques et ajuster l'évolution du chargement au voisinage des charges limites ;
- des méthodes géométriques de détection et d'évolution de surfaces, qu'il s'agisse des surfaces de contact, des fissures qui résultent de la localisation du champ d'endommagement ou de la frontière de la zone endommagée ;

- des schémas de discrétisation spatiale à base d'éléments finis mixtes pour contourner d'éventuels problèmes de verrouillage numérique ;
- des techniques d'éléments finis pour représenter des surfaces de discontinuités au sein des mailles ou entre elles.

Les différents auteurs de l'ouvrage apportent chacun un éclairage particulier sur ces questions. Ainsi, Franz Chouly, Patrick Hild et Yves Renard proposent des méthodes de lagrangien, lagrangien augmenté et de Nitsche, d'application récente, pour traiter les problèmes de contact/frottement. Ils proposent une analyse mathématique fine dans le cadre des petites perturbations élastiques. Ils montrent les liens entre ces méthodes dans le cadre des petites et grandes déformations. Pierre Alart s'intéresse quant à lui à la résolution de systèmes qualifiés à non-régularité diffuse, c'est-à-dire pour lesquels la non-régularité traverse le système en une multitude de contacts potentiels. Cela concerne aussi bien des milieux granulaires que des structures (systèmes de tenségrité, par exemple). Des techniques à base de décomposition de domaine sont analysées. Vladislav A. Yastrebov s'intéresse à des méthodes numériques pour traiter des problèmes du contact à petites échelles, c'est-à-dire pour des surfaces où la prise en compte de la rugosité devient nécessaire. Il montre les particularités du traitement numérique de tels problèmes. Dans un deuxième volet, Jacques Besson traite de l'endommagement ductile. Il aborde la question du couplage entre plasticité en grandes déformations et endommagement et celle de localisation spatiale de l'endommagement qui nécessite souvent l'adjonction d'une équation de bilan supplémentaire émanant des microstructures du matériau. Cette dernière question est reprise par Éric Lorentz dans le cas de l'endommagement fragile, plus brutal que le précédent, en insistant sur le rôle de cette nouvelle équation non locale et son traitement numérique, qu'on peut alternativement interpréter comme une régularisation d'un problème de fissuration, dans l'esprit des modèles à champs de phase. C'est aussi l'occasion d'examiner des schémas numériques adaptés au traitement des instabilités, conséquences du caractère brutal de l'endommagement fragile. L'équation non locale entraîne une organisation spatiale de l'endommagement que l'on peut aussi chercher à imposer directement : c'est l'idée directrice de la méthode TLS que présente Nicolas Moës. Le problème y est réécrit comme la recherche d'une surface de niveau correspondant à la frontière de la zone endommagée. Cette modélisation de l'endommagement offre également un pont vers des modèles de fissuration dans lesquels la problématique numérique majeure reste la représentation d'une fissure sans *a priori* sur le maillage, typiquement *via* des éléments XFEM qui encapsulent la description d'une discontinuité de déplacement (la fissure) et le volume environnant. Enfin, Sylvia Feld-Payet se focalise sur la transition de l'endommagement vers la fissure. Elle aborde notamment les questions de détection géométrique de la fissure à partir d'un champ d'endommagement, de remaillage en conséquence pour représenter explicitement la nouvelle fissure et de transfert de champs de l'ancien vers le nouveau maillage en cours de calcul.