



ACADÉMIE DES SCIENCES INSTITUT DE FRANCE

La mécanique des milieux continus pour le développement des matériaux de l'ingénieur

Discours de réception à l'Académie des Sciences le 6 juin 2023
Samuel Forest

Chères consœurs, chers confrères,
Mesdames et messieurs, chers amis,

La mécanique des milieux continus a pour objectif de décrire la déformation de la matière en faisant abstraction de sa nature discrète moléculaire. Nous fêtons cette année les 200 ans du tenseur des contraintes introduit par Augustin Cauchy, une représentation continue des efforts internes enrichissant de manière radicale la notion de pression qui avait prévalu. Ces contraintes sont aujourd'hui au centre des préoccupations des ingénieurs de la mécanique des solides qui dimensionnent les structures. Les réalisations techniques à l'aube du 21ème siècle telles que le viaduc de Millau ou l'Airbus A380 consacrent le triomphe des sciences mécaniques. Et pourtant, la discipline incite à la modestie car nous éprouvons aujourd'hui bien des difficultés à prévoir les contraintes résiduelles dans les pièces après mise en forme ou bien l'amorçage de fissures dans des tuyaux soumis à la fatigue thermomécanique et à la corrosion.

Comment aller plus loin? En introduisant certains aspects de la microstructure discrète des matériaux dans la modélisation continue. Les alliages métalliques que j'ai étudiés ont une structure granulaire polycristalline, avec ici des grains de zinc en forme de fleurs, dont la couleur indique l'orientation cristalline. La perfection du cristal est perturbée par la présence inévitable de défauts appelés dislocations dont le mouvement et la multiplication constituent le mécanisme élémentaire de la plasticité. La connaissance de ces mécanismes permet de formuler des lois de comportement rendant compte de l'anisotropie de la réponse mécanique et des effets d'échelle. J'ai pour cela eu recours à la mécanique des milieux continus généralisés.

Près de 100 ans après Cauchy, les frères Cosserat introduisent le tenseur des couples de contraintes que j'ai utilisé pour modéliser le développement de la courbure du réseau cristallin lors de la déformation plastique, courbure mesurable expérimentalement grâce aux

techniques de diffraction électronique ou aux rayons X. Dès lors, je me suis pris de passion pour ces généralisations de la mécanique des milieux continus. Je n'ai eu de cesse de construire une unification des théories qui se sont multipliées dans les 40 dernières années. La théorie du second gradient, par exemple, popularisée en France par Paul Germain, connaît aujourd'hui de nombreuses variantes et est utilisée pour la modélisation de la plasticité et de l'endommagement dans les métaux et les géo-matériaux sous forme de bandes de cisaillement ou de fissures.

Dans son livre *Science et Industrie*, dès 1925, Henry Le Chatelier invitait les chercheurs à considérer les créations industrielles comme objets d'études scientifiques. C'est ainsi que j'ai consacré une part importante de ma recherche à un bijou de l'industrie aéronautique qu'est l'aube de turbine monocristalline utilisée dans les moteurs d'avion. Il a fallu pas moins de quarante années de coopération industrielle et académique en France pour concevoir, caractériser et modéliser ces composants dont l'étude est encore largement ouverte.

Je voudrais également mentionner un autre objet d'étude qui défie les lois de la mécanique des milieux continus, à savoir les mousses métalliques, ici des mousses de nickel utilisées dans les batteries : 95% de vide, la nature discrète de ce milieu cellulaire aléatoire est évidente, et pourtant, son comportement élastoplastique peut être représenté par une loi continue tenant compte de la compressibilité de la mousse.

La mécanique des solides investit même l'industrie agro-alimentaire. Grâce à Dominique Jeulin, j'ai pu étudier la mécanique des crèmes glacées, oui, les crèmes glacées qui allient la souplesse de la crème à la raideur des cristaux de glace. Optimiser l'arrangement de ces phases, comme sur ces deux microstructures où la glace est en noir, permet d'atteindre des sensations gustatives inédites!

Toutefois, il ne faut pas céder à un pragmatisme exagéré consistant à subordonner la mécanique à ses réalisations technologiques. Au contraire, gardons l'esprit libre pour inventer de nouvelles descriptions du comportement de la matière. Ainsi, je ne résiste pas à la tentation de montrer ce jeu formel d'équations aux dérivées partielles au centre de l'écran, qui marient la mécanique des milieux de Cosserat à la méthode des champs de phase pour modéliser de manière continue la migration des joints de grains et la recristallisation.

En ce jour, je voudrais remercier les professeurs qui m'ont guidé dans ma formation et ma recherche : Michel Amestoy, André Pineau, Georges Cailletaud, André Zaoui. Ma gratitude va également CNRS, au Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines et aux nombreux doctorants et post-doctorants talentueux avec qui j'ai eu la chance de travailler, car ils ont joué un rôle majeur dans cette recherche.

Chères consœurs, chers confrères, je vous suis reconnaissant de m'accueillir dans cette compagnie, un lieu fascinant de débat entre toutes les disciplines scientifiques. Je découvre les missions de l'académie des sciences et je serai heureux d'y prendre une part active.

Je vous remercie.