Mécanique & Industries 9, 255–259 (2008)
www.mecanique-industries.org
© AFM, EDP Sciences 2008
DOI: 10.1051/meca:2008031

Mécanique & Industries

Quoi de neuf ? La mécanique !*

Jean Salençon[a]

Laboratoire de mécanique des solides, École polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex, France

Le titre de cette communication rappellera sans doute des souvenirs à mon collègue André Zaoui puisqu'il en fut l'auteur, il y une (très) bonne dizaine d'années : c'était l'accroche de la plaquette de présentation de la Majeure Mécanique à l'École Polytechnique. Son actualité demeure : essayant de trouver un fil directeur à une présentation, par nature subjective et incomplète, de l'innovation en mécanique je me suis placé de nouveau et à nouveau dans la position d'un enseignant soucieux de présenter cette discipline dans quelques-unes de ses réalités présentes et vivantes en m'appuyant sur l'expérience que j'ai vécue depuis quelques années à travers les thèmes des cours « avancés » (advanced courses), cours de recherche, dispensés au Centre International des Sciences Mécaniques à Udine (Italie).

Mécanique ?

On ne peut aller plus loin sans aborder la définition de la mécanique. Que sont aussi les mécaniciens, ces êtres si étranges que la traduction de ce mot en anglais se révèle hasardeuse et semble conduire, pour éviter les ambiguïtés, au terme « Mechanicist ».

« La mécanique, c'est la physique du quotidien »[1], je ne suis pas certain de la pertinence actuelle de cette définition, tant la physique est toute entière présente quotidiennement dans notre vie ! Mais il demeure que la mécanique est sans doute une physique que l'on « voit » et que l'on « ressent » quotidiennement, particulièrement lorsqu'elle est la cause des défaillances d'ouvrages, de structures, d'éléments, de composants et de microcomposants : la tenue mécanique est incontournable !

L'évolution actuelle est que, comme le montre l'énumération ci-dessus, la gamme des échelles auxquelles la mécanique est confrontée s'est considérablement accrue, tout autant que la variété des sollicitations considérées, dans le même temps que les exigences devenaient de plus en plus fortes en raison des implications économiques sécuritaires, sociales, voire psychologiques.

La mécanique est fondamentalement caractérisée par son but : l'analyse de systèmes. Dans un souci de simplification d'exposé, on peut tenter d'en schématiser le processus, sans perdre de vue que les différentes étapes que je vais mentionner ne sont pas séquentielles : des retours, des itérations, sont nécessaires pour assurer la cohérence de la démarche et sa pertinence.

La première étape est en quelque sorte « visuelle » elle produit une description géométrique du système, modélisation mathématique qui vise à retenir l'essentiel de la composition de ce système, à en définir les éléments constitutifs et les liaisons entre ceux-ci, en se plaçant à une échelle adaptée à celle des applications concernées par le problème à venir. Ainsi, le mécanicien est initialement géomètre (parfois peut-être inconsciemment) ! Mais il n'est pas que géomètre.

Car, sur la base de cette définition géométrique qui définit, en quelque sorte, l'échelle « macro » (le système) et son échelle « micro » (les éléments), l'analyse se poursuit par la détermination des propriétés mécaniques de ceux-ci, qui sont modélisées mathématiquement. Cette phase est bien plus qu'une simple étape ! Elle implique :

- la construction, sur la modélisation géométrique choisie, des grandeurs observables qui permettent de définir l'état du système et son évolution, pour les besoins du problème ;

* Exposé au colloque *Innover en mécanique*, Cetim Académie des technologies, 6 juin 2008.

[a] Auteur pour correspondance : jean.salencon@polytechnique.org

[1] Définition donnée par un élève de l'École Polytechnique à Jean-Louis Basdevant, professeur de physique.

- la construction cohérente des variables associées, duales dans l'expression de l'énergie, ou plus précisément de la puissance ;
- l'écriture, « juge de paix de la cohérence mathématique » des équations de la dynamique pour cette modélisation ;
- et surtout, l'identification, l'écriture et la validation des lois de comportement, lois constitutives des éléments du système.

La dernière étape est la plus facile à décrire sinon à franchir : c'est la résolution exacte ou approchée d'un système d'équations (fonctionnelles) dans lequel les conditions initiales et les conditions aux limites jouent un rôle essentiel dans le but de déterminer le comportement du système mécanique, sa réponse aux sollicitations auxquelles il est soumis.

Science de l'ingénieur, la mécanique révère le signe « égale » ou, à défaut, les encadrements, tout en tirant grand profit de l'analyse dimensionnelle[2].

Un point vaut peut-être encore d'être mentionné, qui concerne le concept de « modèle » : pour le mécanicien il ne s'agit pas de la recherche d'un modèle unitaire ; il manipule les modèles « emboîtés » ou raccordés ; il sait qu'un modèle ne vaut que pour autant que l'on en a défini et validé le domaine de pertinence, notamment quant aux échelles spatiale et temporelle des phénomènes concernés, à la gamme des sollicitations et au type de résultats recherchés pour les applications.

Les quelques tendances nouvelles dégagées dans la suite résultent évidemment de ce que Paul Germain, dans le *Rapport sur les sciences mécaniques et l'avenir industriel de la France* en 1980, appelait « la dynamique propre des évolutions scientifiques » mais aussi des demandes et des besoins nouveaux en même temps que des nouveaux moyens disponibles : moyens expérimentaux, moyens de calcul, moyens de raisonnement,... La description précédente de la démarche du mécanicien pourra servir de grille de lecture permettant d'identifier quelles étapes sont principalement concernées.

L'utilisation du calcul formel en mécanique

Ce sujet peut paraître de peu d'importance et déplacé s'il s'agit de dégager de nouvelles tendances en mécanique en se référant à l'apport au plan des concepts ou d'une révolution au plan des méthodes. Il vient illustrer l'apport des nouveaux moyens de raisonnement évoqués ci-dessus.

Pour la première fois s'offre la possibilité de passer, pour les calculs analytiques en mécanique des solides, mécanique des structures et mécanique des milieux continus, du modèle séculaire « du crayon et du papier » à quelque chose de complètement différent : le calcul symbolique analytique par ordinateur. Cette nouvelle pratique permet alors, sans solution de continuité, le couplage au calcul numérique puis directement à la visualisation et à l'animation des résultats.

Les opérateurs différentiels et intégraux sur les champs vectoriels et tensoriels de déplacement, de contrainte et d'efforts sont manipulés de façon cohérente et rigoureuse en coordonnées curvilignes orthogonales et, pour ne citer que cet exemple, cette mise en œuvre trouve des applications en élasticité.

Des résultats de recherche ont ainsi été récemment obtenus dans les domaines suivants : mécanique du contact, mécanique de la rupture, analyse des contraintes résiduelles, élasticité non-linéaire et instabilité structurelle (flambage), élasticité anisotrope, piezoélasticité, etc. Le domaine doit également être envisagé du point de vue prometteur de l'enseignement de la mécanique.

Des équipes travaillent sur ce thème notamment à Paris-Jussieu, Palaiseau, Oxford, King's College, Ann Arbor, Mount Carmel (Haifa), etc.

Les approches multi-échelles et multi-physiques

Effets d'échelle en mécanique des matériaux

Le concept d'effet d'échelle n'est pas une nouveauté en mécanique des matériaux et des structures. Mettant de côté son utilisation abusive pour camoufler une linéarisation mal conduite d'un phénomène couplé, on parlera plutôt *des* effets d'échelle.

Les propriétés des matériaux sont en effet en grande partie gouvernées par des effets d'échelle qui résultent de l'interaction de deux échelles de longueur, explicitement : l'échelle du phénomène physique concerné et l'échelle de la microstructure du matériau lui-même.

La demande nouvelle vient des progrès en micro- et nano-technologies qui ont permis la production de matériaux « miniaturisés » tels que les couches ultraminces, les multicouches et multi-réseaux, les nano-composites, les nano-fibres, eux-mêmes permettant la constitution de micro- et nano-composants, micro- et nano-systèmes électromécaniques

[2] On peut observer que le passage trop rapide à l'application numérique conduit souvent actuellement à négliger l'étape essentielle que constitue l'analyse dimensionnelle d'un problème.

(MEMS et NEMS). Cette miniaturisation continue conduit à des contraintes dimensionnelles qui viennent interférer avec celles de la microstructure.

Ceci révèle le besoin d'une connaissance et d'une compréhension des phénomènes mis en jeu au niveau fondamental en rapprochant les différentes communautés physiques compétentes pour élucider l'origine de ces effets d'échelle micromécaniques :

- plasticité, rupture, fatigue de matériaux tels que couches ultraminces, métaux micro- et nano-cristallins, composites,
- rôle du process dans l'évolution micro-structurelle du matériau, prédiction de l'anisotropie par exemple.

Cette voie de recherche est particulièrement sensible à l'évolution des moyens et des méthodes disponibles pour l'observation et le suivi des essais mécaniques à l'échelle de la microstructure à l'aide d'équipements de microscopie de plus en plus performants, notamment en champ proche, tels que la microscopie à effet tunnel, à force atomique (AFM), etc.

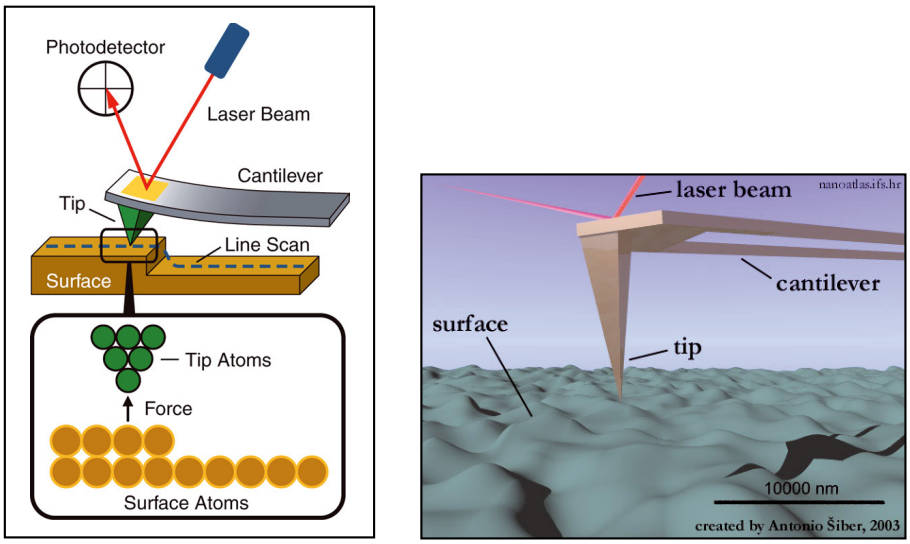


Fig. 1. Schémas de principe de microscopie à force atomique.

En combinant les avancées théoriques et expérimentales sur la dynamique des dislocations et les mécanismes de déformation liés aux interfaces (glissement, diffusion, etc.), on peut notamment modéliser le mécanisme qui cause les effets d'échelle sur la contrainte d'écoulement, la rupture et la fatigue. Une nouvelle demande vient du secteur de l'énergie, notamment mais pas seulement, en ce qui concerne les matériaux nécessaires aux nouvelles générations de réacteurs nucléaires.

De nombreuses équipes se consacrent à cette approche tant en France qu'à l'étranger (Aix-Marseille, Corbeil, Karlsruhe, Leoben, MIT, Münster, Newcastle, Palaiseau, etc.)

De l'échelle atomique à celle de l'ingénieur

Dans le même esprit des analyses multi-échelles on peut citer le défi que constitue encore le passage de l'échelle atomique à celle du « continu ». Un « nouveau souffle » est annoncé dans l'étude et la compréhension des phénomènes mécaniques de déformations localisées dû à ce que :

- d'une part les simulations au niveau atomique auraient atteint l'échelle et la résolution nécessaires pour permettre des expérimentations numériques décrivant les défauts étendus et leurs interactions ;
- d'autre part, de nouveaux outils mathématiques devraient rendre possible la modélisation au niveau microscopique de l'évolution de ces singularités – dislocations, bandes de cisaillement, fissures – qui gouvernent la réponse inélastique des matériaux au niveau macroscopique.

On propose ainsi des modèles numériques destinés à « interfacer » les descriptions au niveau atomique et au niveau « continu ».

Diverses équipes (Lyon, Lille, Cagliari, Trieste, Ann Arbor, Minneapolis, MIT, etc.) se consacrent à cet objectif qui conduirait à pouvoir prédire les propriétés d'un matériau à partir des principes premiers de la physique atomique, sans

recours à l'information phénoménologique qui préside à l'écriture d'une loi de comportement nécessaire à l'analyse d'une structure ou d'un système.

S'il n'est pas évident que cet objectif précis soit atteint ou même en vue, l'intérêt de la démarche est indiscutable au niveau de la conception des matériaux. Il est important de remarquer que les différentes échelles qui doivent être prises en compte et raccordées dans ces analyses sont spatiales et temporelles.

Mécanique et biologie

On abordera maintenant quelques-uns des multiples développements actuels de la mécanique dans le domaine de la biologie.

Mécanique des cellules et des tissus biologiques

Une série de cours sur ce thème se déroule depuis plusieurs années au CISM (Udine, Italie). En effet, le premier domaine qui a attiré l'attention des biomécaniciens est celui des os et l'on peut dire que la discipline correspondante s'est mise en place au cours des trente dernières années. Pour des raisons évidentes liées notamment à la conception des prothèses et à leur implantation elle s'intéresse au comportement mécanique des os comme éléments structuraux constitutifs du squelette mais le comportement du tissu osseux, considéré comme un matériau au sens du mécanicien, est, tout aussi naturellement, important pour les orthopédistes. Ces deux aspects, qui se placent bien dans la ligne de pensée habituelle du mécanicien ont fait l'objet de bonnes recherches. L'intérêt se porte maintenant sur la biomécanique de la cellule osseuse, sa réponse aux stimuli mécaniques et électrocinétiques, recherche qui implique naturellement une plus forte et réelle interaction entre mécaniciens et biologistes.

Un exemple illustratif est celui du remodelage des os : pour s'adapter à la typologie de son chargement habituel l'os change de forme, le tissu osseux change de densité apparente et de raideur en modifiant sa composition en hydrox apatite et collagène. L'os est, en quelque sorte, un composite optimal et le squelette une structure optimale. Les mécanismes cellulaires du système mécano-sensoriel qui gouverne cette adaptation mécanique sont encore inconnus.

On ne peut manquer à cette occasion de rappeler le texte de Galilée dans les *Discorsi* (1638) :
« *ainsi il serait impossible de construire les structures osseuses des hommes, des chevaux, ou des animaux de façon à les assembler et à ce qu'elles remplissent leurs fonctions normales si ces animaux devaient être augmentés énormément dans la taille ; en effet cette augmentation de taille ne peut être réalisée qu'en utilisant un matériau qui est plus dur et plus résistant que le matériau usuel, ou en agrandissant la taille des os, et de ce fait en changeant leur forme jusqu'à aboutir à ce que ces animaux aient un aspect monstrueux.* »

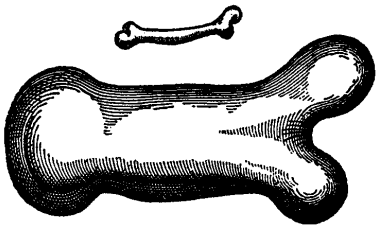


Fig. 2. Figure extraite des *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a due nuove scienze* ».

(Noter que les os de baleines comptent 95 % d'hydrox apatite alors que les tendons de queues de rats comportent pratiquement 100 % de collagène.)

Modélisation biomécanique aux niveaux de la molécule, de la cellule et du tissu

Le champ d'application des recherches précédentes s'est élargi à la biomécanique de la molécule, de la cellule et du tissu d'une façon plus générale. Des chercheurs en biologie, médecine, ingénierie, physique, chimie, science des matériaux et mathématiques appliquées sont impliqués dans des études qui associent la mécanique des milieux continus, la simulation, le calcul et bien évidemment l'expérience. Un objectif est la conception et la production de tissu prosthétique et l'amélioration des diagnostics et des thérapeutiques qui font appel à la mécanique du tissu.

On met en évidence l'importance de l'échelle « nano ». Ainsi, dans le but ultime de produire des matériaux prosthétiques qui permettraient au corps de régénérer les tissus endommagés ou défaillants (tels que le cartilage

chez les patients atteints d'arthrite), on simule in vitro la matrice extracellulaire à laquelle les cellules s'accrochent par un réseau de collagène-glucosamino-glycan sur lequel on mesure les forces d'accrochage des cellules.

À l'échelle supérieure, le point de vue du mécanicien est recherché dans le développement de contraintes résiduelles lors du remodelage des tissus biologiques avec des applications importantes dans le traitement des blessures, l'hypertension artérielle, etc. C'est la base de l'implémentation de modèles mécaniques dans des codes numériques utilisés par exemple pour l'angioplastie par ballon.

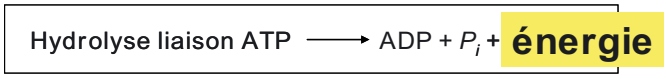
L'énumération n'est que partielle mais montre l'activité du domaine (New York, Milan, Palaiseau, Marne-la-Vallée, etc.).

Nano-mécanique, non-linéarité et complexité

Ce domaine se situe à l'amont du précédent puisqu'il se place au niveau moléculaire, c'est-à-dire à l'échelle « nano ».

Le placer sous le « chapeau » mécanique et biologie vise à marquer l'origine du thème mais les disciplines scientifiques auxquelles il est fait appel, dans des conditions inhabituelles, sont essentiellement la mécanique (incluant l'hydrodynamique), la thermodynamique, la mécanique statistique (processus stochastiques), la chimie et la biologie.

Le nanomètre (10^{-9} m) est typiquement la longueur caractéristique pour les forces et les interactions qui sont impliquées dans beaucoup des réactions biomoléculaires où des liaisons très fortes telles que celle l'adénosine triphosphate (ATP) sont hydrolysées en libérant de l'énergie pour fournir du travail mécanique.



Deux mécanismes sont actuellement proposés pour décrire la façon dont ces réactions, très irréversibles, conduisent à la production de travail mécanique, c'est-à-dire d'un « moteur ». Il s'agit de mécanismes par « tout ou rien » donc fortement non-linéaires, typiques en biologie moléculaire.

Dans le premier, l'hydrolyse de l'ATP provoque une modification de configuration géométrique du substrat qui engendre la force et le mouvement dans le moteur.

Le second est un mécanisme de type « Rochet brownien » dans lequel un mouvement unidirectionnel est produit par la rectification des fluctuations thermiques dues au changement de conformation de la protéine résultant de l'hydrolyse. Il n'est pas utile d'entrer dans plus de détails si ce n'est pour remarquer que l'on produit ainsi des moteurs dont la dimension est inférieure à 100 nm.

On peut s'étonner de constater que des molécules, dont la dimension est de l'ordre de quelques nanomètres, coordonnent l'assemblage ou le mouvement de structures dont les dimensions sont de l'ordre de celles de la cellule, soit plus de 1000 fois supérieures. C'est un des objectifs des recherches actuelles que de tenter de valider ces mécanismes : caractériser les interactions entre les molécules in vitro, puis bâtir la théorie qui permette d'expliquer le passage du comportement individuel au comportement collectif, enfin tester les modèles in vivo.

Des équipes actives dans ces recherches sont à Paris, à Bologne, à Londres, à Berlin, à Bruxelles, etc.

Pour conclure

Cette présentation de quelques tendances actuelles en mécanique est, par nécessité, personnelle et donc partiale. Elle ignore d'autres domaines très importants en développement. Elle procède de la démarche annoncée en préambule et du choix de privilégier quelques aspects parfois inattendus en mettant en évidence l'importance des collaborations interdisciplinaires, tant du point de vue fondamental qu'appliqué.