

12 mars 1993

Jean Salençon

« La mécanique, une science
de l'ingénieur »

Né en 1940, Jean Salençon a choisi la carrière scientifique et l'enseignement dès sa sortie de l'École nationale des ponts et chaussées, en veillant toujours à lier étroitement l'une et l'autre. D'abord chercheur au Laboratoire de Mécanique des Solides, assistant à l'École des mines et à l'École des ponts (1964), il devient maître de conférences à l'École polytechnique et à l'École des ponts après sa thèse de doctorat ès sciences (1969). En 1977, il est nommé professeur à l'ENPC, en 1982 à l'École polytechnique, dont il dirige le département de Mécanique depuis 1985. Il a été chef du département Sciences mécaniques et sciences de la matière à l'École des ponts, de 1980 à 1985.

Jean Salençon se sent avant tout un ingénieur. Bien que faisant appel à des techniques mathématiques sophistiquées, il part des problèmes que pose la pratique : déformation des métaux, capacité portante des fondations, charges limites de matériaux, stabilité des ouvrages en terre et en sols renforcés. C'est ainsi qu'il a formulé, en 1976, la théorie du calcul à la rupture. Il définit la Mécanique comme une physique macroscopique, « qui doit utiliser le signe = bien plus que la microphysique, car elle aboutit à des travaux d'ingénieur, et celui-ci a besoin de savoir où il va ».

Jean Salençon est membre de l'Académie des sciences (1988), ingénieur général des Ponts et Chaussées, vice-président du comité des applications de l'Académie des sciences, président du conseil scientifique de la recherche du groupe Renault.

Principales publications :

- Théorie de la plasticité*, Eyrolles, 1974 (traduction John Wiley & Sons, 1977).
 - Viscoélasticité*, Presses des Ponts et Chaussées, 1983.
 - Calcul à la rupture et analyse limite*, Presses des Ponts et Chaussées, 1983.
 - Elastoplasticité*, (avec Bernard Halphen), Presses des Ponts et Chaussées, 1987.
 - Mécanique des milieux continus*, Ellipses, 1988.
-

Polytechnicien, ingénieur général des Ponts et Chaussées, Jean Salençon a été chef du département des Sciences mécaniques et des sciences de la matière entre 1980 et 1985. Depuis cette date, il est président du département de Mécanique à l'École polytechnique tout en continuant à enseigner à l'École nationale des ponts et chaussées. Il est membre de l'Académie des sciences.

Ma première question est de savoir ce qui t'a amené à choisir cette carrière de professeur et de chercheur ?

Je voudrais d'abord dire que je suis honoré d'être ici et que ce titre « Aux frontières du savoir » me remplit d'humilité après la venue de Jean Bernard, d'Hubert Reeves... J'espère ne pas trop vous décevoir. L'intitulé de cette conférence « La mécanique, une science de l'ingénieur » est déjà une réponse en soi.

Je vais aborder mon parcours professionnel en prenant les choses à l'envers et, comme tu as terminé par la mécanique, je vais débiter par elle. Ce n'est pas par hasard que je fais de la mécanique, elle m'a intéressé depuis mon enfance. Je peux dire que très jeune j'ai été attiré par les machines, notamment celles de la SNCF qui étaient encore à vapeur. J'ai toujours été fasciné par les systèmes de régulation et l'ingéniosité de ces mécanismes, par toute la finesse des systèmes de tiroirs utilisés pour les faire fonctionner et transformer un mouvement longitudinal en un mouvement circulaire. Puis j'y ai découvert l'importance de la notion d'inertie. Mon parcours professionnel commence donc par mon parcours scolaire, une suite de chances et de rencontres. J'ai eu la chance, issu d'un milieu modeste, d'avoir des parents qui m'ont permis de suivre des études et de rencontrer des enseignants de l'école publique. Ils ont bien voulu s'intéresser à moi et m'orienter, sinon je n'aurais eu aucune raison de me retrouver ni à l'École polytechnique, ni à l'École des ponts et chaussées, ni dans les métiers que j'exerce maintenant. Ensuite, mon parcours professionnel se divise à peu près en trois tranches de dix années. Une première au Laboratoire de mécanique où j'ai fait essentiellement de la recherche et un peu d'enseignement, une deuxième à l'École nationale des ponts et chaussées, où j'ai principalement enseigné, et une troisième, où j'enseigne, à Polytechnique. Peut-être faudrait-il maintenant que je songe à bouger ? Je suis en fait reconnaissant de ces changements imposés par les circonstances, car à chaque fois on hésite à quitter un domaine pour un autre. Ainsi, quand je suis venu à l'École des ponts et chaussées, je quittais un certain confort de chercheur pour une position *a priori* moins confortable : enseigner ce dont les gens ont

besoin et se mettre à leur disposition. Dans ce résumé de mon parcours professionnel, je n'ai pas du tout parlé de la dimension *application* que j'évoquerai ensuite.

Pour moi la mécanique se passe plutôt au garage. Qu'est-elle donc ? Et, question subsidiaire, que sont les arts mécaniques ? Comment se fait-il que cette discipline se soit séparée de la physique ?

Que la mécanique se passe au garage ne me choque pas. Je ne renie pas du tout ni ces origines ni cette parenté, car la mécanique se termine aussi au garage et dans les industries. Je ne pense pas qu'elle soit séparée de la physique, mais plutôt qu'elle en est une branche. On peut qualifier la mécanique de physique macroscopique, de physique de la matière condensée. Avant les arts mécaniques, en remontant dans le temps à l'époque d'Archimède au III^e siècle avant J.-C., on trouve déjà la manifestation concrète de la mécanique dont les développements suivent ceux de la géométrie. C'est encore vrai actuellement : sur une modélisation géométrique, par exemple dans l'espace euclidien, on cherche à représenter, à expliquer, à déterminer, les mouvements des corps solides, fluides, dans cet espace. Cette origine, que Paul Germain qualifie de pré-scientifique, dure environ jusqu'à l'époque de Galilée, après quoi le tournant scientifique est pris avec *Les Mécaniques* (1597) et *Les Discours et démonstrations mathématiques sur deux sciences nouvelles* (1638) – la résistance des matériaux et la mécanique des corps pesants – en attendant les *Philosophiae Naturalis Principia mathematica* de Newton (1687). Pour moi, cette mécanique est à la fois une physique macroscopique, issue des applications du concret de tous les jours à notre échelle, mais aussi, au-delà de cette échelle, des problèmes célestes très présents dans les développements dont nous parlons. À partir de cette époque galiléenne, le formalisme mathématique se met donc en place et marque la date de ce que l'on peut appeler « l'époque scientifique de la mécanique ».

Peux-tu revenir sur ce qu'est la physique macroscopique ?

Par opposition à la physique microscopique, qui est la physique des particules, celle qui fait rêver aussi bien quand on l'applique à l'infiniment petit qu'à l'infiniment grand, nous nous situons entre les deux infinis à l'échelle modeste du quotidien.

Pourrais-tu clarifier le rapport des mathématiques et de la mécanique ? Dans quelle mesure le substrat mathématique est-il fondamental ou non, où s'inscrit-il et à quel moment par rapport au travail du mécanicien ?

« Les relations sont bonnes ». Au-delà de la boutade de l'humoriste, il y a une réalité car la mécanique se fonde sur des mathématiques. Doit-on parler d'*outils mathématiques* aussi bien pour la mécanique que pour la physique ? Cette notion a pour moi peu de sens, de même que la notion de *mathématique de service*, de crainte que l'on ne l'assimile à la *porte de service* par où l'on passe quand on n'a pas les honneurs de la grande. Je pense qu'un mécanicien doit avoir une bonne formation mathématique qui lui donne envie de faire joyeusement des mathématiques chaque fois que cela est nécessaire. Les relations avec les mathématiques sont essentielles car la mécanique est liée à ses applications : elle fait appel au signe *égal*, donc à un raisonnement mathématique précis, et ne se contente pas de tendances. Nous avons réellement besoin des mathématiques pour nos modélisations, car le niveau atteint est tributaire des mathématiques maîtrisées. Il y a des moments où, parce que l'on ne dispose pas des mathématiques voulues, on bute sans parvenir à franchir un certain cap, même si l'on sent bien que des possibilités existent. Il est utopique de penser accumuler tous les pré-requis mathématiques qui pourraient servir ensuite, mais il faut pouvoir les acquérir en cours de route. La mécanique conduit jusqu'au garage après être passée par le chef de chantier, l'ingénieur et le théoricien... Ce parcours fait qu'il y a une difficulté assez particulière à la mécanique que l'on rencontre beaucoup moins dans d'autres branches de la physique : adapter à chaque instant le langage mathématique à l'interlocuteur. Il faut fonctionner avec ce que les Britanniques appellent le *common knowledge*, c'est-à-dire la *connaissance commune*, en mathématiques. En revanche, pour citer un exemple personnel, lors de la publication d'un article dans une revue appliquée anglo-saxonne il nous fut demandé que les mathématiques soient *désarmées* – *disarmed* – c'est-à-dire de quitter les notations compactes et familières (?) à nos collègues français pour des notations plus familières à nos collègues anglo-saxons : l'exercice nous fut, à vrai dire, très profitable ! Il y a là un problème réel qui peut constituer un obstacle à la transmission des avancées de la recherche au niveau des applications et qui explique aussi, peut-être, que faire passer les choses d'un stade à l'autre prenne beaucoup de temps.

Ce souci de devoir « traduire » a-t-il une incidence sur la créativité en mécanique ?

Peut-être faut-il se placer en amont de la modélisation. Depuis l'époque galiléenne, nous avons accumulé des siècles et des siècles d'observations et d'expériences. Expérience, modélisation, validation : cette démarche est perpétuellement présente. Au moment de la modélisation nous travaillons avec les « outils mathématiques » disponibles dans notre esprit. Les choses se mettent plus ou moins bien en place, et nous voyons apparaître un concept qui pourra être identifié à un concept mathématique. Il faut ensuite savoir si la modélisation, la théorie, est bonne ou mauvaise : il faut la valider. D'abord vérifier qu'il n'y ait pas de faute dans le raisonnement logique, ce qui la rendrait nulle ; puis s'assurer que la théorie n'est pas valable que pour une seule expérience, ce qui ne mènerait pas très loin ; et aussi s'assurer qu'elle s'applique à plus d'expériences qu'elle n'introduit de paramètres ! En fait une théorie, une modélisation, va avoir un domaine de pertinence identifié au fur et à mesure des expériences de validation. La nécessité d'abandonner une théorie ou de la dépasser se fait sentir quand il faut y introduire des facteurs de correction en nombre croissant pour rendre compte de telle ou telle expérience nouvelle. C'est le moment où tout se joue quant à l'*innovation*, l'*invention*. Si la situation devient inconfortable, c'est souvent, pour nous, parce que l'analyse physique est insuffisante ou que le concept mathématique n'est plus adéquat. Il faudra alors trouver autre chose, passer à une échelle différente, à un concept plus général qui permette plus de liberté.

Tu as inventé le calcul de la rupture. Peux-tu expliquer dans quel état tu as trouvé le problème et quel changement de système de pensée tu as introduit pour parvenir à cette modélisation ?

Je récuse les mots *inventé* ou *inventeur* sauf si on les prend « au sens de la rue des Morillons », là où se trouvent les objets oubliés. Sans faire étalage de mon histoire, je suis rentré en 1964 dans un laboratoire dont le patron m'a laissé la chance de trouver moi-même mon sujet de thèse et de le réaliser à peu près tout seul : il fut pour moi à la fois un grand guide et une ombre protectrice. Aux environs de l'année 1973, alors que ma thèse était finie et que j'enseignais déjà à l'École des ponts et chaussées et à Polytechnique, j'avais le sentiment que le corpus d'hypothèses à la base de la théorie des charges limites était trop res-

trictif au regard des applications que l'on en souhaitait faire, notamment dans le domaine de la mécanique des sols. La théorie était de fait utilisée par tous, au prix de contorsions pour rendre compte des exemples où elle ne s'appliquait pas vraiment. Conscient de ce que ma connaissance de tout ce qui avait été réalisé avant moi était bien limitée et du risque de quitter le confort de la routine intellectuelle de la théorie de la plasticité, mon problème était de savoir si je me décidais à tenter de bâtir quelque chose de plus satisfaisant. De façon peut-être un peu irraisonnée, je me suis jeté à l'eau. J'ai pu utiliser les mathématiques, essentiellement l'analyse convexe que j'ai apprise alors, pour essayer d'en tirer une théorie. Certains disent que « innover c'est transgresser », si l'on regarde les obstacles, ma transgression fut d'éviter le confort de la routine, d'ajouter des mathématiques différentes alors que l'on fonctionnait jusque-là avec des démonstrations que tous acceptaient volontiers. Je suis donc reparti à la base pour comprendre sur quoi pouvait être fondé le raisonnement de l'analyse limite. Il se révéla, pour les applications que l'on voulait en faire, ne nécessiter que la moitié des hypothèses utilisées, ce qui expliquait les contradictions, les paradoxes rencontrés dans certains cas courants.

Cette théorie s'est donc fondée sur le concept, en apparence simple, de résistance – ou plus exactement de limite de résistance – d'un matériau c'est-à-dire sur le fait de savoir ce que l'on peut lui faire subir jusqu'à ce qu'il se casse. Ce peut être bien entendu une donnée expérimentale, mais aussi une donnée imposée par un règlement qui nous interdit de dépasser une certaine limite. Comme ingénieur des Ponts discipliné, je n'allais évidemment pas au-delà des limites !

C'est à partir de cette idée que j'ai bâti la théorie du *calcul de la rupture*. La première formulation complète que j'en ai publiée date de 1976. Elle n'a guère évolué depuis, du point de vue des démonstrations mathématiques de base qui sont très simples. En revanche, le niveau de langage a certainement été beaucoup allégé. À l'époque, je la présentais sous une forme difficile à pénétrer avec des symboles mathématiques sans doute décourageants voire hermétiques pour nombre de ceux à qui elle devait être destinée. Je suis tout à fait redevable aux personnes avec qui j'ai travaillé – élèves, chercheurs, amis, collègues – qui m'ont, autant de fois que nécessaire, fait des remarques m'obligeant à penser de nouveau, à modifier la présentation dans le sens de la simplification et m'ont ainsi souvent aidé à mieux comprendre ce que j'avais pu faire. Lors de mes activités à l'École des ponts, qui m'ont beaucoup donné l'occasion de voyager, les relations que j'ai eues avec des collègues ou

étudiants d'autres pays m'ont été très profitables, parce que chaque personne étrangère rencontrée à qui l'on veut parler de ses travaux oblige à se mettre dans le cadre de sa pensée et de ses connaissances. La connaissance commune à ce moment là c'est la connaissance des lois fondamentales.

*Que peux-tu apprendre à un béotien sur le calcul de la rupture ?
Qu'est-ce que ce calcul m'apprend sur la matière ?*

Le calcul de la rupture part d'un concept local qui est la résistance du matériau ; il permet de passer du local au global et ne peut donc rien t'apprendre que tu ne saches déjà sur la matière. Ce qui est intéressant, c'est justement ce passage du local au global, c'est-à-dire le passage du matériau, de la matière, au système. C'est d'ailleurs souvent la démarche du mécanicien dans sa réflexion théorique alors qu'au plan expérimental il n'a vraiment accès qu'au point de vue global. L'élasticité non plus ne t'apprendra rien que tu ne saches déjà : ainsi, si tu tires sur un élastique l'allongement sera initialement proportionnel à la force que tu appliques. Cette prise de conscience que la notion de comportement était un aspect local fut un point fort de la formulation du modèle élastique élaboré au XIX^e siècle. Cauchy a décrit les déformations et les efforts intérieurs dans ce que nous nommons maintenant un milieu continu avec les mêmes outils que les nôtres, même s'ils n'étaient pas encore formalisés. Il essayait de décrire mathématiquement un phénomène global observé sur un système. L'idée lui est venue que l'on pouvait obtenir cette description à partir d'informations locales caractéristiques du matériau qui le constituent et de lois générales. C'était là quelque chose de très fort : c'est la structuration des équations de la mécanique que nous utilisons quotidiennement. Cherchant en fait la formulation tridimensionnelle de l'élasticité, Cauchy a dégagé le concept incroyablement fécond de *tensions* intérieures, – les *contraintes* de notre terminologie actuelle – dont la pertinence m'étonne chaque année davantage quand je l'enseigne aux étudiants, car il transcende les phénomènes physiques sous-jacents.

Le *calcul à la rupture* pour le comportement d'un système, en dépit de données précises au niveau de la résistance de la matière, va d'abord montrer que cette précision sera perdue et que plus d'informations seraient nécessaires pour certifier la résistance du système. Sans cela nous n'aurons que des présomptions de résistance, ce qui peut sembler terriblement frustrant surtout pour un ingénieur, mais aussi des

certitudes de rupture si certains niveaux de chargement global sont dépassés. S'il faut admettre cette faiblesse de la théorie, il faut aussi considérer sa force. En effet, si d'autres théories produisent des conclusions plus affirmatives, ces conclusions ne valent évidemment pas plus que les hypothèses et les données supplémentaires qu'elles présupposent : bien souvent hélas ces données sont manquantes ou, pire, ne sont pas fiables. Aussi la théorie du calcul à la rupture fournit-elle des garde-fous avertissant des limites à ne pas franchir. Avec le bon sens, le sens physique et « l'art » de l'ingénieur, on se rend compte de ce qu'il faudra assurer pour que le système aille jusqu'au bout de ce qu'il pourrait supporter. C'est une des approches de la théorie de la sécurité des structures.

Pour être clair et franc quant à l'origine de la théorie, on doit d'abord citer Galilée avec les premiers exemples de *calcul de la rupture* dans les *Discours* (1638). Puis, d'autres illustres personnages, bien connus dans cette maison, y ont apporté des contributions essentielles : on ne peut évidemment manquer de citer Coulomb que je considère personnellement comme le fondateur de la théorie en 1773. Mon modeste apport se situe peut-être à deux niveaux : une formulation, et donc une vision, plus unitaire d'une part, une ouverture sur les méthodes numériques actuelles d'autre part. Par exemple selon que l'on pense à la mécanique des sols, au calcul des dalles en béton, aux plaques métalliques, ou au formage des métaux..., on s'aperçoit que des méthodes spécifiques sont utilisées dans chacune de ces spécialités et sont même élevées au rang de « théories ». Or à la lumière de ces quelques travaux, nous sommes obligés de constater que ces méthodes ne sont que des moyens mis au service de la même théorie unitaire et simple, à tel point qu'elles peuvent être, chacune, prises individuellement et utilisées dans un domaine comme dans l'autre. Il n'y a pas de spécificité des méthodes. Un même problème, traité par un mécanicien des sols et par les gens du formage des métaux, utilise des schémas différents qui peuvent se croiser comme en botanique. Cet apport, qui sans doute ne porte ni sur la connaissance de la matière ni sur celle des systèmes, peut nous être profitable en matière d'innovation.

L'abstrait est souvent assimilé à la notion du concept et des idées, alors que le concret est plus ce qui est palpable. En mécanique, qu'est-ce qui est concret et abstrait ?

Cette question est fondamentale dans la mesure où elle fait partie des reproches classiques faits à notre système de formation et des incan-

tations qui nous invitent à faire plus de concret et moins d'abstrait, alors que chacun entend des choses différentes dans ces deux termes. À titre de boutade, je citerai cette phrase bien connue « la poule qui a trouvé un couteau ». Qu'y a-t-il pour nous de plus concret qu'un couteau ?... et pourtant, pour une poule ce n'est pas concret du tout puisqu'elle ne sait pas s'en servir. J'ai un peu le même sentiment, notamment lorsque les gens (qui enseignent peu) nous donnent des conseils en disant : « il faut faire du concret » : ils parlent de leur propre concret, alors que pour les étudiants le concret est tout à fait différent. La réalité industrielle que je côtoie parfois n'a rien de concret pour un étudiant qui sort de Taupe. Pour acclimater ce concret, tout un travail progressif est à faire auquel nous nous employons aussi. Je suis en revanche persuadé que pour beaucoup d'étudiants, comme pour nous, divers concepts de mécanique comme les forces et les contraintes finissent, à force de manipulations et d'appropriations, par être si concrets que l'on en vient à oublier leurs caractères de modèles et, par conséquent, leurs limites éventuelles de pertinence. Ceci doit sans doute nous inciter aussi à une certaine prudence, mais le danger n'est pas à nos portes !

En tant qu'enseignant, très soucieux de la qualité de l'enseignement, que crois-tu indispensable de faire pour que les élèves aient accès à ce concret ?

Pour tenir compte du temps très limité que les élèves peuvent consacrer à leur formation, il faut faire moins de théories parcellaires juxtaposées. C'est une question de réalisme, plus on mettra de cours, plus les enseignants se limiteront à l'exposé du squelette mathématique qui restera théorique et abstrait, et moins il y aura de manipulation de concepts. Je crois qu'une modélisation devient concrète à partir du moment où on la manipule sur des exemples de plus en plus ouverts par le biais de pédagogie de type atelier mais en ayant d'abord commencé par des problèmes relativement fermés, des problèmes d'école. L'enseignement anglo-saxon, devant lequel nous sommes souvent en admiration dans le domaine des sciences physiques, met en évidence cette pratique de la manipulation, alors que chez nous, parce que nous dominons assez bien les mathématiques qui sont une des caractéristiques de notre formation, on a un peu trop tendance à penser qu'une fois la théorie absorbée, il suffit de la mettre en œuvre sur un exemple sur lequel elle s'applique et un autre sur lequel elle ne s'applique pas, avec le risque conséquent de faire croire aux gens qu'elle n'est valable qu'à 50% ! C'est

pour cette raison que le praticien juge souvent notre façon de procéder comme étant abstraite.

Comment se fait-il que nous ayons une telle réticence à faire évoluer l'enseignement vers cette pratique qui consisterait à manipuler vingt exemples plutôt qu'un seul ?

Les choses bougent, mais des ressorts de rappel ramènent périodiquement à la situation antérieure. Je cite souvent Bernard Hirsch qui citait lui-même Gaston Berger disant : « Les programmes sont démentiels, il faut en supprimer la moitié », et il ajoutait : « n'importe laquelle ». Il faut évidemment aller au-delà du propos : un travail de sélection est à faire pour définir la « grosseur » et la consistance de la moitié des matières à mettre de côté. Hirsch prônait « l'enseignement en pointillé », c'est-à-dire qu'il admettait que l'étudiant peut passer tout seul d'un point à un autre par son travail personnel, la recherche et la manipulation personnelle de la documentation et un rendu personnel supplémentaire. C'est du pur bon sens dès lors que l'on se place du point de vue de la formation, et ce, en dépit de certains qui pensent que toutes leurs préoccupations techniques ou scientifiques personnelles peuvent, sinon doivent, faire l'objet d'un enseignement. Des régulations sont périodiquement nécessaires, tous les systèmes dévient.

La culture française est très encyclopédique, les élèves eux-mêmes réclament ce type d'enseignement.

Il est facile de faire parler les élèves au travers de la parole d'un seul, à condition qu'il pense comme vous, de sorte qu'il ne reste qu'à dire : « les élèves pensent que... ». Je ne suis pas sûr que les élèves réclament ce type d'enseignement encyclopédique. Je crois plutôt qu'ils aimeraient être confortés dans l'idée que la formation qu'ils reçoivent est effectivement une formation en laquelle ils peuvent avoir confiance et sur laquelle ils pourront s'appuyer ensuite. Ce qui est gênant dans notre formation, c'est qu'à la fin des études nous semblons, peut-être par souci exacerbé d'honnêteté intellectuelle, les laisser dans l'incertitude sur ce point. Pour en revenir à la question, je crois que nous autres, enseignants, avons trop souvent tendance à réagir en disant « un élève de l'École des ponts ne peut pas sortir sans savoir que... » Si nous faisons la somme de tout ce qu'ils devraient savoir, ce serait absolu-

ment délirant, pour ne rien dire de l'efficacité réelle d'une telle formation !

Dans ce cas quelle est la solution ?

Beaucoup de gens ont réfléchi sur la question de la formation des ingénieurs en France. Ils ont rédigé des rapports épais ou minces, les plus minces n'étant pas les moins intéressants. À mon avis, une des lacunes de notre enseignement est de ne pas valoriser l'innovation dans la formation. On forme des gens qui vont avoir tendance à reproduire, sans les encourager à innover alors que, paradoxalement, je crois que l'école est un lieu propice à l'innovation : les enseignants y sont, en principe, une réserve de connaissances et de savoir, et les risques inhérents à l'innovation en milieu industriel en sont absents. Actuellement, lorsque l'on pose un problème, ses questions débouchent sur des réponses fermées à partir d'une modélisation donnée au départ ; très rarement, pour ne pas dire jamais, on se pose la question de la modélisation initiale. Par contre dans une pédagogie de type « atelier », on se retrouve en équipe face à un problème posé : partant de l'idée qu'une modélisation peut s'appliquer, on se heurte à un échec, qui est positif puisqu'il faut encore se poser des questions, voir s'il faut changer le modèle, ou constater que le modèle s'applique mais de manière plus ou moins réduite... Voilà des pistes à suivre pour donner confiance dans la formation reçue, pour être capable de penser qu'elle constitue une boîte à outils dans laquelle chacun va puiser pour répondre aux questions qui se poseront à lui ultérieurement... Bien qu'il soit à peu près certain que nous n'aurons jamais dans la boîte à outils la réponse toute prête au problème posé, sinon à quoi bon être ingénieur !

Q : J'ai l'impression que la mécanique, tout comme la mécanique céleste ou la mécanique de l'infiniment petit, est considérée comme une science de seconde zone. Partagez-vous ce sentiment ? Estimez-vous que cette situation est en train de changer ? Les mécaniciens sont-ils plus bêtes que les autres ou font-ils des choses moins intéressantes ? Vous-même, n'êtes-vous pas un peu amer à ce sujet ?

L'amertume n'est pas de mise, même s'il est vrai que la mécanique se trouve parfois devant la difficile nécessité de devoir affirmer son identité entre les mathématiques (pures et appliquées) – notamment avec le développement des approches numériques – et la physique. Si la

confrontation des points de vue est toujours profitable, les querelles de frontières sont stériles mais elles relèvent parfois de motifs assez peu scientifiques. Est-ce là l'origine de ce que vous qualifiez de « seconde zone » ? Peut-être est-ce aussi la contrepartie du caractère de « physique du quotidien » de notre discipline, dont les applications, pour importantes qu'elles soient, ne font plus rêver. À celui qui la pratique, à celui qui l'enseigne, à celui qui l'étudie, je suis persuadé que la mécanique réserve, comme les autres sciences, de grands moments d'exaltation. J'évoquais tout à l'heure le concept de contraintes qui permet de décrire les efforts intérieurs dans un milieu continu : je suis convaincu qu'au moment où il acquiert cette notion, l'étudiant, consciemment ou non, voit se modifier la perception qu'il a des objets qui l'entourent. Quel Hubert Reeves saura nous faire rêver sur les contraintes... ?

J'écarte évidemment l'hypothèse de la bêtise des mécaniciens, même si l'adverbe « mécaniquement » suggère rarement la réflexion ! Pour ce qui est des objets d'études et de recherches des mécaniciens, je prendrai l'exemple des matériaux qui sont un des éléments clés du progrès technique, pour lesquels les mécaniciens sont associés à leurs collègues physiciens, chimistes, métallurgistes.

Peut-être doit-on enfin évoquer le caractère dit de « Science pour l'Ingénieur » (SPI au CNRS) d'une grande partie de la mécanique. Le choix largement discuté du « pour » dans cette appellation n'appelle aucune interprétation de « science de seconde zone ».

La mécanique est beaucoup plus reconnue dans l'industrie que dans le monde académique, mais peut-on tout avoir à la fois ? La mécanique nous fait exister et les étoiles nous font rêver...

Q : Je suis un ancien élève de l'X, on m'y a enseigné beaucoup de chose intéressantes, mais il ne s'est trouvé personne pour me proposer de faire un bilan de ce que j'avais appris.

Je le regrette tout autant que vous, voilà ce qu'il y a de vraiment paradoxal dans nos écoles : nous faisons toujours des emplois du temps où il est impossible de déplacer quoi que ce soit. Je crois qu'il y a d'abord un manque de temps de maturation, car pour faire ce que vous souhaitez il faudrait, pour un module d'enseignement, essayer de faire un bilan à la fin de ce module. Le faire plus tard avec un certain décalage, en ayant eu entre-temps ce que j'ai appelé la manipulation pour

l'appropriation, serait encore beaucoup plus intéressant. Nos écoles passent à côté de cela. J'ai récemment discuté longuement avec un de mes élèves actuels dont la frustration était qu'en dépit des cours qu'il pensait avoir assimilés, il restait persuadé qu'il n'avait pas eu le temps ni de saisir ni de pénétrer les méthodes. Nous ne parvenons pas – la faute revient évidemment aux enseignants et au système lui-même – à nous mettre dans la tête que, d'une part l'étudiant peut et doit travailler seul et que, d'autre part, l'augmentation du temps de travail encadré est contradictoire avec cet objectif. Il faut avoir une exigence de rendu vis-à-vis de ce travail personnel. Une de vos camarades, qui m'a écrit pour faire part de son expérience à l'université de Santa Barbara aux États-Unis, évoque un devoir par semaine, des projets en grand nombre et beaucoup d'exigence de rendu et de travail personnel : elle ne s'en plaint pas. Je prendrai à nouveau l'exemple de ma discipline. Pour les étudiants fraîchement issus de Taupes, à l'École des ponts et chaussées comme à Polytechnique, la mécanique des milieux continus est un domaine franchement nouveau qui va leur demander un investissement de travail important s'ils veulent en acquérir les concepts fondamentaux et les méthodes. En y regardant de plus près, on comprend qu'une fois cet investissement fait, toute une capitalisation et une valorisation sont possibles avec très peu d'investissements supplémentaires du point de vue des concepts, en pratiquant un travail personnel gratifiant dans une pédagogie par cas ou par projet : c'est une occasion concrète de bilan qui n'est le plus souvent pas mise à profit.

Q : Il semble qu'un certain nombre d'esprits dans beaucoup de grandes écoles se détournent de la recherche. Que pensez-vous que l'on puisse faire pour ramener ces personnes vers la recherche et donc permettre à la France d'avancer vers eux ?

Il faudrait plutôt s'interroger sur les motifs qui peuvent guider quelqu'un vers la recherche et ensuite savoir ce qui peut l'en écarter. Effectivement dans les écoles considérées ici, il y a des gens qui, après une information réelle sur les métiers disponibles, peuvent avoir envie de faire de la recherche pour y trouver la satisfaction de leurs goûts. Des gens peuvent ainsi s'orienter vers ce domaine dans le souci d'approfondir certains points, de faire une réalisation scientifique ou technique. Ils peuvent ensuite choisir de s'orienter vers un métier différent après un passage plus ou moins long en recherche. Une telle démarche n'a évidemment rien de choquant. Vous pensez sans doute plutôt à des vo-

cations de chercheurs qui se découragent pendant le passage dans les écoles. Il y a évidemment les vocations que je qualifierais de superficielles, qui s'apparentent plus à un engouement fondé sur une vision scolaire ou médiatique, sur une méconnaissance des réalités de la vie de chercheur ; que ces vocations éphémères s'éteignent, à la découverte d'une part des contraintes du métier et d'autre part de toute la panoplie des activités possibles dans la vie économique, me paraît une bonne chose. En revanche, il est grave que des vocations solides et réelles se découragent en constatant les réalités de la reconnaissance du chercheur dans la société comme dans les compagnies industrielles, de sa position sociale dont le salaire est une bonne mesure, de ses possibilités de carrière... La situation s'est beaucoup dégradée depuis l'époque des années cinquante et soixante. Elle est préoccupante aujourd'hui, comme en témoignent les difficultés rencontrées par les docteurs après leur thèse dans certaines disciplines. On doit signaler qu'en ce qui concerne les possibilités de carrière, dans certaines grandes entreprises, les chercheurs, reconnus experts, atteignent, en demeurant dans la recherche, des niveaux égaux aux plus hauts niveaux des carrières traditionnelles hiérarchiques. Un problème mal résolu dans notre pays demeure le transfert des résultats de la recherche vers les applications industrielles.

Q : Vous avez parlé de la rupture entre la mécanique et la physique. N'y a-t-il pas des chercheurs qui travaillent à faire le pont entre la mécanique quantique ou la physique statistique et la mécanique sur laquelle vous travaillez ?

Il y a effectivement des gens qui y travaillent. Nous avons affaire à des *modèles emboîtés* multi-échelles et nous sommes capables de faire le pont entre le point de vue microscopique du physicien et celui, macroscopique, du mécanicien, ce qui permet des progrès. Mais lorsque ce pont s'établit on doit encore résoudre des problèmes de calibrage de coefficient, c'est-à-dire que partant de la physique on va expliquer certains comportements mécaniques, par exemple expliquer l'élasticité à partir de la déformation du cristal ou la plasticité à partir de la dislocation, mais cette explication, qui fait progresser la connaissance et la compréhension des phénomènes mécaniques macroscopiques et peut même guider le mécanicien dans sa modélisation ou dans l'évolution souhaitable de celle-ci, demeure essentiellement qualitative, va rarement au-delà des ordres de grandeur, et nécessite l'identification expérimentale des caractéristiques mécaniques macroscopiques correspondantes. En mécanique des fluides, notamment dans le domaine des recherches

en turbulence, il est bien clair qu'entre les gens qui font de la physique statistique à l'École normale et les mécaniciens qui font de la recherche en turbulence, y compris de la mécanique numérique des fluides, il y a tout un continuum de recherche sur un phénomène essentiel du point de vue technique. Le modèle de turbulence joint aux possibilités de calcul sera d'une très grande importance. Sur ce point je serais incapable de qualifier quelqu'un de pur mécanicien des fluides et un autre de pur physicien statistique des fluides car les deux sont liés. De la même façon, dans le domaine des plasmas, on trouve tout autant des gens identifiables comme mécaniciens des fluides que comme physiciens.

Q : *On a l'impression qu'en mécanique, des modèles existent pour tout expliquer. Dans ce cas, que reste-t-il encore à trouver ou à rechercher dans ce domaine ?*

Votre question me fait penser à ce dessin (humoristique ?) où trois hommes primitifs étant assis sur leurs talons devant quelques silex taillés, méditent en entendant l'un d'entre eux dire « c'est dommage, tout est inventé ! ». Oui des modèles existent, peut-être trop de modèles d'ailleurs, et ils n'expliquent pas tout. En disant « trop de modèles », je pense que la prolifération de modèles *ad hoc*, notamment dans des domaines variés de la mécanique appliquée, est souvent la preuve d'une mauvaise explication, d'une compréhension insuffisante notamment du point de vue des phénomènes physiques observés éventuellement à un niveau trop global. Je crois à ce propos que les progrès significatifs résultent alors d'un approfondissement en redescendant à un niveau microscopique physique plus fondamental et non dans le raffinement mathématique ou numérique des modèles. En disant que les modèles « n'expliquent pas tout », j'affirme là une évidence dont les exemples abondent, tels que l'étude de la turbulence en mécanique des fluides, dont les applications industrielles sont essentielles, et qui fait l'objet de nombreuses réunions scientifiques chaque année. En ce qui concerne les modèles eux-mêmes, j'insiste sur les modèles *emboîtés* ou *couplés*, dont j'ai déjà parlé, qui sont certainement une des voies les plus prometteuses actuellement.

Q : *Les champs d'application ne distinguent-ils pas la mécanique de la physique ?*

À l'évidence oui, souvent, tout en évitant une fois encore de dresser des frontières. À titre d'exemple, je ne vois guère en quoi les champs d'applications de la physique d'un Pierre-Gilles de Gennes ne pourraient être qualifiés de mécanique !

À ce propos des applications, je souhaiterais revenir sur la première question que m'a posée Michel Juffé et compléter ma réponse. Dans mon choix de la recherche, et de la recherche en mécanique particulièrement, j'ai été guidé à la fois par le désir de satisfaire mon besoin intellectuel d'approfondissement et de simplification dans les domaines que l'on m'avait enseignés, et par le souci d'être un tant soit peu ingénieur en débouchant, je l'espérais du moins, sur des applications concrètes. Personnellement j'ai toujours trouvé rassurant d'avoir en quelque sorte les « pieds dans les applications », même si j'ai dû vivre avec la contradiction d'être « l'appliqué » des uns et le « théorique » des autres. On retrouve ici le problème du langage dont j'ai déjà parlé, celui aussi de la contribution du chercheur à la formation initiale ou continue qui, pour être efficace, nécessite un réel engagement au service de l'interlocuteur. J'ai le sentiment personnel que les activités réelles de ce type devraient être mieux reconnues dans l'évaluation des chercheurs dans notre discipline.