

MATHEMATIQUES ET FORMATION DES INGENIEURS

par

J. Cea

(Professeur à l'université de Nice)

et

P.- A. Raviart

(Professeur à l'Ecole Polytechnique)

Intervenants :

Pierre BERARD (Université de Grenoble)

Paul CHAMPSAUR (Direction de la Prévision Ministère des Finances)

Claude DESCHAMPS (Professeur de Mathématiques Spéciales au Lycée
Louis le Grand et Président de l'Union des Professeurs de
Spéciales)

Daniel GOURISSE (Directeur de l'Ecole Centrale et Président de la
Conférence des Grandes Ecoles)

Bertrand MERCIER (Aérospatiale)

Marc PELEGRIN (Directeur du C.E.R.T de Toulouse).

Deux cents personnes environ ont suivi cette table ronde qui avait pour thème le rôle des mathématiques dans la formation des ingénieurs. Le constat suivant était au point de départ de la réflexion des divers intervenants : "Les mathématiques occupent en France une place traditionnellement considérable dans la formation des ingénieurs : c'est d'une part un critère prépondérant de sélection ; c'est également un moyen de formation de "bons esprits" capables d'abstraction et de synthèse. Cette image classique du rôle des mathématiques est désormais remise en question. On peut en effet se demander s'il est encore raisonnable de sélectionner par des mathématiques. A l'inverse, les mathématiques - outre leur vertu de formation - n'ont-elles pas désormais un rôle plus important de vecteur indispensable dans le progrès des sciences et des techniques ?"

En un mot, il s'agissait de répondre aux interrogations suivantes : Quelles mathématiques pour l'ingénieur et comment les enseigner de manière à doter les futurs ingénieurs d'un outil puissant dont ils mesurent l'utilité ?

On trouvera ci-après les exposés des intervenants

- La place des mathématiques dans les grandes écoles (D. Gourisse)
- Les mathématiques en classes préparatoires (C. DESCHAMPS)
- Les magistères de mathématiques et la formation des ingénieurs mathématiciens (P. Bérard)
- Mathématiques et formation des ingénieurs en économie et gestion (P. Champsaur)
- Le rôle des mathématiques dans l'industrie (B. Mercier)
- Quelles mathématiques pour l'ingénieur de demain (M. Pelegrin).

I. LA PLACE DES MATHEMATIQUES DANS LES GRANDES ECOLES par Daniel Gourisse

Je ne suis pas mathématicien. Ce qui expliquera que mon exposé portera essentiellement sur des préoccupations ou observations du responsable d'éducation, même si leur lien dans le détail avec le sujet d'aujourd'hui est un peu lâche.

Il n'est pas inutile, tout d'abord, de situer le système de formation des ingénieurs français dans le contexte international. L'ingénieur français est formé avec un niveau d'exigences, en ce qui concerne la qualité du recrutement, la durée des études, les objectifs des projets de formation, qui est considérablement plus élevé que celui lié à la formation des ingénieurs dans d'autres pays.

On peut dire pour simplifier, que les ingénieurs français sont des "ingénieurs de conception", qui doivent être dotés d'une très large culture pluridisciplinaire. Même dans les écoles spécialisées en France, nous formons des ingénieurs beaucoup plus généralistes que dans les formations d'ingénieurs étrangères. On peut ajouter aussi que (selon une tradition que l'on peut qualifier de jacobine ou napoléonienne) au-delà de la formation à finalité professionnelle, les écoles d'ingénieurs françaises, tout au moins les plus prestigieuses d'entre

elles, portent une mission de dégagement des élites pour l'activité économique du pays.

La première mission des mathématiques est, à l'évidence, la sélection de nos élèves ingénieurs par les concours après les classes préparatoires. Cela paraît un truisme, mais il n'est pas inutile de rappeler qu'il y a une quarantaine d'années, les mathématiques n'étaient pas l'outil privilégié de la sélection des ingénieurs, mais le latin et le grec.

Pourquoi les mathématiques ? Il y a des raisons factuelles : elles sont un outil primordial des sciences de l'ingénieur. Elles le sont de plus en plus, notamment à travers le développement des moyens informatiques qui ont permis à certains systèmes d'équations, à certaines théories mathématiques de devenir des outils de tous les jours pour l'ingénieur. Elles cultivent la rigueur, la puissance de travail, la synthèse qui sont très utiles. Mais les mathématiques ont aussi une autre vertu, et c'est sur celle-là que je voudrais insister : dans la mesure où nous devons former des ingénieurs de conception, nous devons former des personnes qui soient capables de maîtriser l'abstraction. En effet, la démarche de l'ingénieur consiste à effectuer, à partir de l'observation d'un phénomène concret, la modélisation de ce phénomène en un modèle abstrait, le travail sur ce modèle abstrait et ensuite seulement le retour au concret. Et à mon sens, la véritable justification du poids important des mathématiques dans la sélection de nos élèves ingénieurs est précisément cette capacité d'abstraction.

Ceci étant, nous sommes un grand nombre de responsables d'écoles à regretter qu'au cours des dernières années, comme dans tout le système éducatif français, l'enseignement des mathématiques soit devenu trop exclusivement l'enseignement des mathématiques déductives. C'est une tradition culturelle : nous sommes dans un pays où la logique déductive a "pignon sur rue". C'est aussi une facilité pédagogique (dans la mesure où nos projets sont ambitieux) parce que la logique déductive permet d'apporter le maximum de connaissance dans le minimum de temps. Mais son usage exclusif est dangereux pour la formation des esprits. Nous le constatons pour nos concours d'entrée : l'esprit de géométrie de nos futurs élèves ingénieurs est trop souvent réduit à sa plus simple expression. Parallèlement, les jeunes abordent la physique par la logique déductive et ignorent la réalité des concepts expérimentaux sur lesquels sont appliquées les lois de la physique.

Au surplus, la logique déductive est une logique d'enseignement de certitudes. Elle risque de stériliser, chez les jeunes, les capacités d'écoute, de dialogue et surtout d'imagination et de créativité. Ce n'est pas un procès que je fais à l'enseignement des mathématiques. Il concerne l'ensemble du système éducatif français. Il est regrettable que, dans ce domaine, nous ayons oublié certaines formes de mathématiques plus intuitives qui corrigeaient ces excès.

Je voudrais ajouter que le dysfonctionnement actuel qui fait du baccalauréat C le seul baccalauréat d'enseignement général reconnu comme un baccalauréat de qualité avec une sélection outrancière des intelligences françaises avant 17 ans, est une catastrophe pour le pays. Ceci déborde largement les problèmes de la formation des ingénieurs.

En revanche, que les mathématiques tiennent une place tout à fait privilégiée dans la formation des ingénieurs français, la sélection, et l'entrée dans les écoles, ceci nous paraît tout à fait légitime. Il n'est pas possible, en quelques minutes, de dresser un panorama de ce que peut être l'enseignement des mathématiques dans les écoles d'ingénieurs. Nous avons le sentiment que les réponses apportées par les établissements sont très diverses, par la complexité et le grand nombre de facteurs qui influent sur les choix qui sont la base de la conception des projets pédagogiques.

Cette complexité tient tout d'abord à des effets de mode. Nous voyons, avec une période de l'ordre de 5 à 10 ans, passer des générations d'élèves ingénieurs qui alternativement nous reprochent, soit de faire un enseignement trop appliqué et nous demandent de tirer l'enseignement vers les disciplines fondamentales, soit, à *contrario*, de faire un enseignement beaucoup trop sophistiqué, abstrait et mal adapté au métier, et nous demandent de revenir à l'application.

Cet effet de mode est une première difficulté. Une deuxième touche de plein fouet l'enseignement des sciences de base, et notamment des mathématiques : les anciens taupins, lorsqu'ils ont réussi le concours d'entrée dans une école, croient que tout est arrivé et pensent qu'ils sont déjà des ingénieurs. Ils marquent de très grandes réticences à l'égard d'un approfondissement ultérieur des disciplines apprises dans les classes préparatoires. Ceci met les enseignants de mathématiques des écoles d'ingénieurs dans une position très difficile.

Troisième constatation, à travers le développement des technologies, à travers l'intensification de l'utilisation de l'informatique, le nombre d'outils mathématiques utiles dans les sciences de l'ingénieur va sans cesse croissant, et évolue. Ceci veut dire que les enseignants de mathématiques sont soumis de la part de leurs collègues d'autres disciplines, à des pressions de plus en plus fortes, pour enseigner tous les outils dont ces autres disciplines ont besoin.

Enfin, par l'évolution sociale que nous vivons, nos écoles d'ingénieurs sont obligées, au-delà de la formation scientifique et pédagogique, de prendre en compte de façon croissante une formation humaniste qui bien souvent a été insuffisante avant l'arrivée dans nos écoles. Cela alourdit nos programmes et la place réservée à l'enseignement des mathématiques comme à celui des autres disciplines est, dans nos écoles, de plus en plus réduite (sauf dans des options ou des spécialisations de 3^{ème} année).

Face à toutes ces difficultés, j'ai, personnellement, deux convictions :

La première, c'est que l'enseignement des mathématiques dans les écoles sera toujours difficile à cause de l'état d'esprit des élèves ingénieurs, et à cause de sa rapidité qui ne laissera pas la possibilité d'exercices d'approfondissement aussi importants que ceux connus antérieurement par les élèves. Il y aura toujours frustration de ceux-ci vis-à-vis de l'enseignement des mathématiques.

La deuxième certitude : il faut, dans nos écoles, poursuivre un enseignement des mathématiques pour les mathématiques et pour la formation des esprits, au-delà de la simple acquisition par les élèves ingénieurs d'outils utiles pour d'autres disciplines. Il n'est pas possible de faire un enseignement accepté par les élèves, motivant nos élèves, si nous nous limitons à l'application.

Un dernier mot, la place des mathématiques dans les écoles d'ingénieurs, c'est également la place des mathématiciens dans nos activités au-delà des cours, travaux dirigés et enseignement. De ce point de vue, nous voyons depuis quelques années apparaître des expériences fort enrichissantes qui sont l'insertion d'enseignants de mathématiques dans des laboratoires de recherche de sciences physiques de nos écoles, où ils apportent une compétence complémentaire, et où ils ont un dialogue (axé vers le progrès de la connaissance) entre leur propre excellence et l'excellence des

responsables de sciences physiques et technologiques. Je crois qu'il y a là de grandes espérances, pour l'avenir de nos projets de formation et pour les mathématiques.

II. LES MATHÉMATIQUES EN CLASSES PRÉPARATOIRES , par Claude Deschamps.

Chaque année plus de 10 000 élèves entrent en classe de Mathématiques Supérieures soit sensiblement le quart des bacheliers C et E ; après deux, éventuellement trois années passées dans nos établissements environ 7 500 d'entre eux vont accéder à une Grande Ecole à l'issue de laquelle la grande majorité va exercer le métier d'ingénieur. Ces quelques chiffres montrent l'importance des classes préparatoires dans la formation des cadres scientifiques.

L'enseignement en classes préparatoires est très lourd. Il comporte plus de trente heures par semaine de cours et de travaux pratiques avec une forte composante scientifique : quatorze heures de Mathématiques, plus de neuf heures de Sciences Physiques.

L'enseignement des Mathématiques a essentiellement deux objectifs :

- Le premier est l'acquisition par les élèves de connaissances théoriques solides ; il s'agit de leur apporter des bases sûres, de développer chez eux l'esprit d'analyse des situations, de leur offrir une formation qui leur permettra de s'adapter aux exigences futures.

Cet enseignement de base est irremplaçable. L'étude, souvent difficile mais menée cependant jusqu'au bout, des théories classiques, développe tout d'abord l'esprit logique des étudiants, leur apprend à ordonner leurs idées et aussi, car la quantité de travail réclamée est importante, à organiser correctement ce travail ; cette discipline et cette rigueur intellectuelle, ils la conserveront toute leur vie.

Mais cet enseignement de Mathématiques est aussi irremplaçable par son contenu. Les ingénieurs ne sont pas de simples utilisateurs ; ils doivent au contraire connaître les théorèmes qu'ils utilisent et leurs limites, savoir appliquer ces théorèmes mais aussi savoir en douter, savoir les modifier en fonction de nouvelles données : une part importante de l'enseignement des Mathématiques en classes préparatoires doit être consacrée aux exemples et aux contre-exemples.

Enfin cet enseignement de Mathématiques dites pures est aussi pour les étudiants l'occasion de maîtriser des concepts et un langage qu'ils retrouveront dans des domaines très divers ; c'est l'apprentissage de ce langage universel qui leur permettra d'aborder ensuite aussi bien des ouvrages sur la théorie des vibrations que des ouvrages sur l'économie.

Mais évidemment l'enseignement des Mathématiques ne peut se limiter à cet aspect purement théorique car les étudiants vont pour la plupart d'entre eux exercer le métier d'ingénieur, et pour eux de telles études seraient stériles sans un second volet : "le savoir faire".

- C'est le second but de l'enseignement en classes préparatoires ; il s'agit d'apprendre aux élèves à transformer leurs connaissances théoriques, à les appliquer à la résolution effective et complète de problèmes, cette résolution se traduisant la plupart du temps par ce que l'on appelle des calculs et débouchant évidemment sur des résultats numériques.

Ce second aspect est lui aussi indispensable : toute théorie mathématique enseignée en classes préparatoires doit être suivie d'exemples concrets et d'exercices, elle ne doit pas être enseignée pour elle-même mais en vue des applications.

Ce délicat équilibre entre connaissance et "savoir faire" est fragile et il y a quelques années on a pu craindre qu'un excès de formalisation dans l'enseignement des Mathématiques nuise à l'aspect "savoir faire" ; c'est maintenant un problème dépassé. Les nouveaux programmes de Mathématiques mettent l'accent sur une moins grande formalisation, sur le développement de l'analyse numérique et sur le développement des applications ; en particulier chaque chapitre du programme se termine par une rubrique claire : travaux pratiques.

Ce retour aux applications va en outre être accéléré par l'introduction, depuis la dernière rentrée, de l'usage de micro ordinateurs. Cet usage, modeste pour le moment, est un complément à la formation scientifique des élèves, complément qui renforce l'aspect "utilisation" de l'enseignement des mathématiques mais qui à terme, va développer un changement de mentalité dans cet enseignement. Il est clair que l'aspect analyse numérique, voire modélisation, va devenir très important ; il est clair aussi que certaines démonstrations purement formelles vont céder la place, chaque fois que cela sera

possible, à des démonstrations algorithmiques préparant ainsi les étudiants à l'analyse des Problèmes en vue d'une solution informatique.

Cette évolution, ce retour à des mathématiques en vue des applications, sont très importants et les Grandes Ecoles et l'Industrie qui constituent l'aval des classes préparatoires ont un rôle à jouer ; les études universitaires ont préparé les professeurs à l'enseignement des théories mais souvent ceux-ci connaissent mal leurs domaines d'applications. C'est en ouvrant largement les Ecoles ou les Laboratoires Industriels aux enseignants, lors de visites ou de stages, qu'ils seront le mieux sensibilisés aux problèmes de l'ingénieur et qu'ils pourront ainsi contribuer pleinement à la formation des cadres scientifiques dont notre pays a besoin.

m. MAGISTERES DE MATHEMATIQUES ET FORMATION DES INGENIEURS MATHEMATIENS par Pierre Bérard

1. Généralités

Le magistère est un diplôme d'université qui s'acquiert en trois ans, de bac+2 à bac+5 ; les premières accréditations datent d'octobre 1985. Il y a actuellement cinq magistères à forte composante mathématique (nous dirons "magistères de mathématiques" pour simplifier) :

- Universités parisiennes : magistère "Mathématiques fondamentales, appliquées et informatique" ;
- Université Rennes I : magistère "Modélisation mathématique et méthodes informatiques" ;
- Université Grenoble I, Université Lyon I et Ecole Normale Supérieure de Lyon : magistère "Mathématiques et Applications" ;
- Université Bordeaux I : magistère "MATMECA" .

2. Finalité des magistères de mathématiques

Ces cinq magistères visent à former des cadres de haut niveau, possédant une culture mathématique et une formation pluridisciplinaire (calcul et informatique scientifiques, mécanique, ...) solides, ainsi qu'une bonne pratique de l'outil informatique.

La nécessité d'une filière de formation d'ingénieurs mathématiciens résulte de l'intervention de plus en plus fréquente de

mathématiques de haut niveau dans les divers secteurs de l'activité économique et industrielle.

Bien qu'elle ne soit plus actuellement la seule forme sous laquelle interviennent les mathématiques, la modélisation mathématique joue un rôle particulièrement important, aussi nous limiterons-nous à ce seul aspect des applications des mathématiques. La modélisation mathématique intervient dans divers domaines où elle permet :

- d'améliorer l'adéquation des produits aux besoins,
- de réduire, voire de remplacer l'expérience (que ce soit sur maquette ou en vraie grandeur),
- de prévoir ou de simuler des phénomènes complexes.

De fait, elle joue un rôle important dans des domaines aussi variés que la construction aéronautique, l'électronique, la biologie, la recherche pétrolière, les matériaux complexes, la géophysique ... C'est-à-dire dans le domaine des sciences et des techniques, mais aussi dans celui de l'économie et comme aide à la décision (que ce soit pour le lancement d'un produit, pour évaluer l'impact de mesures économiques ou sociales, pour comparer des formules d'investissement ...).

La modélisation mathématique apparaît donc comme un outil indispensable d'aide à la compréhension, à la conception et à la décision.

On peut essentiellement distinguer cinq étapes générales dans la démarche modélisatrice :

1. analyse du problème (qu'il soit physique, mécanique ou économique, avec prise en compte éventuelle de "l'aspect aléatoire ou stochastique"),
2. modélisation mathématique proprement dite (c'est-à-dire choix du cadre mathématique : probabiliste ou déterministe, des équations éventuellement simplifiées mais représentatives du phénomène étudié et utilisables pour un calcul approché réaliste),
3. choix des méthodes de résolution du modèle mathématique (compromis entre efficacité, précision, robustesse et coût),

4. validation des résultats par des tests sur des équations simplifiées et par comparaison avec des mesures expérimentales,
5. création enfin d'un environnement informatique rendant le code de calcul facilement utilisable par un ingénieur ou un technicien supérieur suivant la finalité du code (informatique graphique pour la saisie des données et la visualisation des résultats par exemple).

Ces étapes qui pouvaient autrefois être confiées à un ingénieur généraliste doivent souvent être traitées en collaboration avec un ingénieur mathématicien, d'où la nécessité de filières spécifiques, aptes à former des cadres capables d'intervenir dans les différentes étapes de la modélisation ou dans d'autres aspects des applications des mathématiques.

Les magistères de mathématiques ont l'ambition de répondre à cette nouvelle capacité.

3. Organisation des études

Trois idées de base sous-tendent les magistères de mathématiques :

QUALITE, OUVERTURE, FORMATION PAR LA RECHERCHE.

1 - QUALITE

- *Qualité des étudiants* : par un recrutement sélectif, pour de petites promotions (une vingtaine d'étudiants par promotion), après le Deug A ou après les classes préparatoires. Le magistère propose ainsi, aux bons étudiants, une formation en trois ans aux buts précis, donc une formation motivante, plus cohérente et plus flexible que la formule classique maîtrise + DEA. Le magistère donne aussi, à ceux des élèves des classes préparatoires qui se trouveraient mal servis par les aléas des concours, une possibilité de poursuivre des études tournées vers les mathématiques ou leurs applications.

- *Qualité de l'encadrement* : les enseignements sont assurés par des enseignants et des chercheurs appartenant à des laboratoires d'envergure nationale et internationale et aussi par des experts de secteurs industriels de pointe.

b - OUVERTURE

- magistères de mathématiques certes, mais avec une orientation pluridisciplinaire marquée (pour certains vers la mécanique, pour d'autres vers la physique, l'informatique, la biomathématique, ...) et, toujours présentes, les méthodes de l'informatique.

- ouverture vers les milieux économiques et industriels : elle se concrétise par la participation d'experts extérieurs dans les enseignements, les conférences, mais surtout par les stages industriels (en seconde et troisième année). Le Conseil de Perfectionnement, auquel participent de manière importante les représentants des secteurs économiques et industriels, garantira quant à lui une évolution des enseignements qui soit compatible avec les besoins des employeurs potentiels.

c - FORMATION PAR LA RECHERCHE

Deux principes fondamentaux pour les enseignements :

- donner aux élèves des bases théoriques solides qui resteront au cours de leur vie professionnelle un facteur de clarification et le moyen de prendre du recul vis-à-vis des problèmes rencontrés ;

- développer chez les élèves le sens du concret et l'aptitude à concevoir et à élaborer des méthodes réalistes aboutissant à des solutions effectives.

Compte tenu du haut niveau mathématique de la formation, il est aussi possible de présenter aux élèves les grands courants des mathématiques contemporaines ; certains d'entre eux seront peut-être les bases des applications de demain (calcul formel, géométrie algébrique et codes correcteurs d'erreurs, théorie des nombres et cryptographie, systèmes dynamiques, applications de la géométrie à la physique, à la CAO ou à la robotique).

Dès la seconde année (souvent même par un stage en fin de première année) les élèves sont mis en contact avec des laboratoires où ils s'initient à la recherche.

Ces premiers contacts avec la recherche sont indispensables pour faciliter l'insertion des élèves dans des équipes pluridisciplinaires (en milieu industriel par exemple), pour le choix d'un domaine de

recherche en vue d'une thèse éventuellement, et pour des "retours aux sources" pendant leur vie professionnelle.

4. Conclusions

Formations en trois ans, de bac+2 à bac+5, avec des objectifs précis (former des ingénieurs mathématiciens pour les bureaux d'étude ou les centres de recherche des entreprises à haute technologie, ou pour des sociétés de services), les magistères de mathématiques permettent à l'université d'offrir aux jeunes des filières débouchant sur des carrières de cadres de haut niveau.

Il ne s'agit pas ici de tenter de reproduire en milieu universitaire les cursus caractéristiques des écoles d'ingénieurs, mais au contraire d'offrir des formations de niveau comparable, en gardant la spécificité universitaire et en visant d'ailleurs un créneau différent sur le marché de l'emploi : formations moins généralistes que celles dispensées par les écoles, mais plus ouvertes que celles proposées par les filières universitaires classiques.

Les magistères conduiront peut-être à une nouvelle conception de la formation en mathématiques ; filières pour former des mathématiciens praticiens pluridisciplinaires, les magistères de mathématiques n'excluent pas de former aussi des mathématiciens fondamentaux, ayant une culture non exclusivement mathématique (la co-existence des deux espèces au sein d'une même promotion ne peut qu'être bénéfique).

La coopération entre industries et universités, déjà fréquente au niveau des laboratoires de recherche par l'intermédiaire des contrats, s'est intensifiée avec la création de nouvelles filières (en particulier, pour ce qui est des mathématiques, avec les Maîtrises de Sciences et Techniques, avec les Maîtrises d'Ingénierie Mathématique, suivies éventuellement d'un D.E.S.S. ou d'un D.E.A). Les magistères de mathématiques viennent compléter ces filières à finalité professionnelle avec une ambition déclarée pour la qualité et l'ouverture.

IV. MATHEMATIQUES ET FORMATION DES INGENIEURS EN ECONOMIE ET GESTION par P. Champsaur

Dans un certain nombre de domaines tels que l'économie, la finance, la gestion d'entreprise, il est de plus en plus fait appel à de jeunes diplômés scientifiques et notamment à des ingénieurs. On voit

ainsi croître une demande d'ingénieurs émanant de secteurs d'activité ou de fonctions à l'intérieur des grandes entreprises que l'on croyait, il y a une vingtaine d'années, réservés quasi exclusivement à des juristes, des comptables, des économistes, des commerciaux. Bien sûr, on n'attend pas de l'ingénieur qu'il se substitue à ces derniers mais qu'il apporte une compétence et un savoir-faire particuliers qui complètent ceux d'autres professionnels. Au-delà de la politique de personnel de certaines entreprises qui considèrent que l'intelligence passe avant le détail des connaissances scolaires, les trous pouvant se combler par l'expérience acquise sur le tas, il me semble que ce phénomène a une origine plus profonde. L'informatisation systématique des procédures de gestion génère dans une grande organisation une masse considérable d'informations quantitatives. Pour peu que ces informations soient convenablement structurées, il devient possible, toujours grâce à l'informatique, de les mobiliser afin de mieux analyser le fonctionnement de l'organisation et d'adopter des techniques de gestion de plus en plus sophistiquées. Ceci influe non seulement sur les modalités de gestion interne des entreprises, mais aussi sur les relations entre entreprises, que celles-ci soient bilatérales ou qu'elles passent par des marchés dont le fonctionnement est également de plus en plus complexe. A titre d'exemple, une entreprise doit être capable d'analyser la nature des risques que génère son activité, et d'apprécier dans quelle mesure elle doit couvrir ces risques par un appel aux marchés à terme et marchés d'options. Pour prendre un autre exemple dans un domaine que je connais bien, il est maintenant possible au Ministère des Finances de tirer dans les fichiers de la Direction Générale des Impôts des échantillons de plusieurs dizaines de milliers de contribuables, ménages ou entreprises, permettant non seulement de simuler les effets budgétaires d'une disposition fiscale mais d'étudier plus généralement certains comportements économiques. Pour concevoir de telles opérations, il faut évidemment adjoindre à des spécialistes de droit fiscal des compétences analogues à celles d'un ingénieur.

Je ne suis pas capable de fournir une estimation globale de l'importance pour les ingénieurs des débouchés nouveaux que je viens de décrire. Il serait d'ailleurs utile pour les écoles de mieux les connaître. Néanmoins les éléments d'information épars dont je dispose montrent que ces débouchés sont devenus très significatifs pour les grandes écoles d'ingénieurs parisiennes. A titre d'exemple, je citerai le cas de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 28% des élèves sont recrutés à la sortie par des banques ou des organismes de conseil en gestion, soit à peu près autant que pour l'ensemble des secteurs qui constituaient le débouché traditionnel de l'ENPC, à savoir Transports,

Bâtiment, Travaux Publics et Ingénierie technique. Les grandes écoles d'ingénieurs telles que l'École des Mines, l'École Centrale, l'ENPC, l'École Polytechnique ont réagi en créant de véritables options centrées sur l'économie et la gestion, options auxquelles un élève peut consacrer une part importante de son temps. Toujours dans le cas de l'ENPC, un bon tiers des élèves choisissent ce type d'option. On doit également citer le succès de grandes écoles récentes, spécifiquement conçues pour répondre à ces nouveaux besoins, comme l'École Nationale de l'Administration Economique et de la Statistique (ENSAE) dont le niveau de recrutement et d'enseignement sont comparables à celui des grandes écoles d'ingénieurs. L'Université elle-même s'est adaptée en créant de nouvelles formations comme les filières de mathématiques appliquées aux sciences sociales (MASS), ainsi que des 3èmes cycles.

Un élève ingénieur qui viserait le type de débouché que j'ai décrit doit-il encore apprendre des mathématiques et quelles mathématiques ? Ma réponse à la première question est clairement positive. Il suffit d'ailleurs de regarder les programmes d'une école comme l'ENSAE pour constater qu'une fois entré dans cette école, le taupin y apprendra au moins autant de mathématiques que dans la plupart des écoles d'ingénieurs. Ce serait à mon avis une erreur grave que de limiter la formation scientifique à l'acquis des classes préparatoires et de vouloir trop tôt et trop exclusivement spécialiser des élèves ingénieurs qui perdraient leur originalité vis-à-vis par exemple des diplômés d'écoles de commerce.

Quelles mathématiques faut-il enseigner en sus des programmes des classes préparatoires ? Je voudrais insister sur trois idées. Tout d'abord une formation minimale dans le domaine du raisonnement probabiliste et de la statistique est absolument nécessaire. Le fait que, dans la première partie de mon exposé, j'ai utilisé des mots tels que risque, échantillon, masse de données quantitatives est révélateur à cet égard. Cette formation ne doit pas être uniquement abstraite et doit pouvoir, à partir d'exemples concrets, déboucher sur une compréhension de la valeur de l'information et, plus généralement, des problèmes de décision en situation d'incertitude. Ensuite, parmi les branches des mathématiques, je citerai l'analyse en privilégiant l'analyse convexe et ce qui est utile à la présentation des méthodes d'optimisation. Au risque de mécontenter les spécialistes d'analyse numérique qui se trouvent autour de cette table, je recommanderai de mettre l'accent plutôt sur la compréhension des méthodes d'optimisation que sur les problèmes de mise en oeuvre. En effet, la panoplie des logiciels maintenant disponibles répond de façon satisfaisante aux

besoins de la plupart des applications à l'économie ou à la gestion. Mon dernier point ne concerne pas les programmes d'enseignement mais plutôt les objectifs pédagogiques.

Une qualité essentielle que l'on recherche chez un ingénieur c'est la capacité à modéliser un problème. Dans cette capacité entre bien entendu une aptitude très personnelle à trier ce qui est important et à juger ce qui est possible, mais je crois que l'enseignement peut développer la capacité de modélisation. Il ne suffit pas qu'un ingénieur connaisse la théorie des probabilités et la théorie du contrôle optimal. Il faut en outre qu'il ait eu l'occasion de voir comment un problème concret peut être analysé et simplifié, de façon que les techniques probabilistes ou d'optimisation puissent s'appliquer de façon pertinente. J'y vois également un autre avantage. Il se trouve que les élèves-ingénieurs attirés par des métiers différents de ceux qu'exerçaient traditionnellement les ingénieurs font souvent partie de ceux qui, à leur arrivée dans les écoles, estiment que leur formation mathématique est suffisante et ne sont guère motivés pour l'accroître. Rapprocher l'enseignement des mathématiques de l'exercice de modélisation, c'est-à-dire d'un exercice plus inductif et plus proche des applications, peut contribuer à résoudre le problème de motivation que posent ces élèves.

V. LE ROLE DES MATHÉMATIQUES DANS L'INDUSTRIE par B. Mercier

1. Introduction

Les mathématiques constituent aujourd'hui un instrument privilégié de sélection des ingénieurs des grandes écoles car elles contribuent à développer la capacité d'abstraction et l'esprit de synthèse.

Pour un industriel, la justification de ce choix vient plutôt de ce que, dans un certain nombre de domaines, comme par exemple le contrôle automatique des systèmes, on passe plus de temps à formuler un problème qu'à le résoudre.

L'idéal de tout mathématicien est de se ramener à un problème déjà résolu, et ceci implique l'acquisition d'une certaine culture mathématique.

Cependant, la capacité de poser un problème ne s'acquiert pas en apprenant de belles théories abstraites imaginées par d'autres, mais plutôt en s'attaquant soi-même à des problèmes réels, où la méthodologie n'est pas suggérée dès le départ.

Ceci doit inciter les grandes écoles à continuer à pratiquer, dans une certaine mesure, la formation par la recherche.

Mais l'industrie a aussi besoin d'ingénieurs initiés à plusieurs disciplines à cause de l'imbrication de celles-ci, que nous tenterons d'illustrer par un exemple.

Nous parlerons ensuite de la simulation numérique, au développement de laquelle les mathématiques ont le devoir de participer.

Nous terminerons en mentionnant deux disciplines nouvelles, particulièrement importantes pour l'avenir de l'industrie : la CAO et les bases de données.

2. Imbrication des disciplines scientifiques dans l'industrie

Je me contenterai d'un exemple qui concerne l'Aérospatiale : le développement d'un missile ou d'un lanceur concerne au moins 4 disciplines qui sont étroitement imbriquées :

- *l'aérodynamique*, dont le but est de calculer les coefficients aérodynamiques du missile et les flux thermiques à sa paroi,
- *le pilotage*, dont le but est de le stabiliser sur trajectoire, à l'aide d'asservissements appropriés,
- *le calcul des structures*, qui vise à déterminer les efforts généraux subis par les différentes parties du missile, afin de les dimensionner,
- *la propulsion* qui est, pour l'Aérospatiale, une donnée extérieure.

Il est évident que de nombreux allers-retours sont nécessaires entre les différentes disciplines : citons par exemple le bouclage entre aérodynamique et structures pour les problèmes de "flottement" et d'aéroélasticité, le bouclage entre le pilotage, les structures et la propulsion pour l'élimination de l'effet POCO.

Par ailleurs, on ne peut pas faire de pilotage sans déterminer l'efficacité des gouvernes, ce qui est typiquement de l'aérodynamique.

Pour mener à bien les projets de grande envergure dont elle a l'ambition, l'Aérospatiale a besoin, non seulement de spécialistes dans chacune des disciplines, mais aussi d'ingénieurs plus généralistes permettant d'assurer la liaison entre les différentes disciplines, et ceci est encore plus vrai lorsqu'il s'agit de constituer une équipe de projet.

Cependant, les mathématiques occupent une place de choix dans chacune des disciplines de base.

En aérodynamique, citons les schémas décentrés pour les équations d'Euler ou de Navier-Stokes, la théorie des couches limites, les modèles de turbulence.

En pilotage, on utilise la méthode L.Q.G. (Linéaire Quadratique Gaussien) et le filtre de Kalman ou les méthodes de placement de pôles (sait-on par exemple que pour rendre plus performants les avions supersoniques, on doit accepter qu'ils soient instables à basse vitesse, c'est-à-dire au décollage et à l'atterrissage). On fait appel au calcul formel pour établir les équations du mouvement à partir des Lagrangiens de la mécanique rationnelle.

Le calcul des structures est fondé sur la méthode des éléments finis, la théorie des coques et le raccord entre les coques et les structures tridimensionnelles.

3. La simulation numérique

Le PIF (Paysage Industriel Français) a été profondément modifié par le développement des ordinateurs et en particulier de la simulation numérique. Cette évolution ne va pas dans le sens d'un amoindrissement du rôle des mathématiques, bien au contraire.

Un code de calcul met en oeuvre un modèle physique faisant intervenir le plus souvent des équations aux dérivées partielles, que l'on doit discrétiser en choisissant généralement un maillage et, le cas échéant, un pas en temps.

Le problème discret doit être résolu généralement de façon itérative, ce qui nécessite l'introduction d'un critère de convergence approprié.

La validation du code commence par la vérification de la justesse de la programmation et progresse ensuite pas à pas, en vérifiant la précision du code sur des cas simples où la solution est connue, de préférence analytiquement.

Tout ceci est du ressort du mathématicien.

Le travail du physicien commence avec la confrontation à l'expérience : à lui de définir les expériences qui permettront de déterminer les paramètres de son modèle. Il appliquera ensuite le code aux expériences complexes qui constituent sa motivation profonde, et l'accord entre calculs et expérience mettra parfois en évidence la nécessité de revoir les critères de choix, des maillages, des pas en temps, du test d'arrêt des itérations, mais aussi des paramètres du modèle physique, sans que l'on sache *a priori* lequel est à incriminer.

Ce schéma montre

- la nécessité d'un dialogue mathématicien-physicien,
- que partout où il y a la simulation numérique, on a besoin de mathématiciens.

Où y-a-t-il de la simulation numérique ? Dans les domaines où les expériences sont soit d'un coût élevé, soit impossibles. Par exemple :

- essais en soufflerie pour simuler des écoulements hypersoniques,
- réflexion électromagnétique sur des diélectriques,
- mise au point du pilotage d'ARIANE.

Même si c'est plus coûteux, on ne renoncera pas pour autant aux expériences pour des questions de crédibilité, mais on comptera sur les simulations numériques pour faire des études paramétriques.

Ajoutons pour conclure cette partie que de véritables défis sont lancés à la simulation numérique, par exemple : l'allumage du moteur cryogénique du 3ème étage d'ARIANE, ou le calcul des coefficients aérodynamiques d'HERMES et des flux thermiques à la paroi.

4. La CAO et les bases de données

C'est paradoxalement au moment où la géométrie disparaît des programmes des concours d'entrée aux Grandes Ecoles que la CAO fait son apparition.

Les outils existants de CAO sont excellents, mais évidemment perfectibles.

Pour surmonter la complexité des logiciels, il faut faire appel aux techniques les plus modernes de l'informatique (langages orientés objet par exemple) nécessitant un pouvoir d'abstraction important qui semble plus accessible aux jeunes générations, mais, pour constituer une équipe, il faut aussi faire appel aux vieux loups de la géométrie descriptive.

Tant que ceux-ci sont disponibles, il n'y a pas péril en la demeure, mais l'ignorance de la géométrie parmi les jeunes générations ne laisse pas d'inquiéter (il est d'ailleurs remarquable de voir leur capacité à raisonner de façon abstraite, là où nous, nous aurions dessiné une figure).

Par ailleurs, un des défis qui se posent aux industriels est l'intégration de toutes les données relatives à un produit complexe, comme par exemple l'AIRBUS 320, dans des bases de données évoluées (relationnelles ou autres) permettant de gérer, non pas seulement le plan d'une pièce, comme le fait actuellement la CAO, mais d'un assemblage de 150 000 pièces. On attend beaucoup de tels systèmes : qu'ils indiquent quelles sont les autres pièces à modifier lorsque l'on fait une modification sur une pièce donnée, et éventuellement que ces modifications soient faites de manière automatique.

Tout ceci donne bien la mesure des progrès à accomplir dans la prochaine décennie.

5. Conclusion

Les Mathématiques offrent une approche rigoureuse des problèmes, qui ne permet certes pas de les résoudre tous, mais qu'il est raisonnable d'appliquer chaque fois que le problème s'y prête.

La rigueur ne doit pas faire oublier le pragmatisme : de très bons mathématiciens ont fait progresser la résolution numérique des systèmes hyperboliques non linéaires, alors qu'ils ne savaient pas nécessairement dans quel espace il y a existence d'une solution.

Le souci de développer le pouvoir d'abstraction est louable, mais il est parfois plus facile de démontrer un théorème abstrait que de démontrer qu'il est applicable sur un exemple concret.

L'industrie a besoin de mathématiciens qui acceptent de mettre leur talent et leur culture au service des problèmes pratiques et qui n'ont pas peur de se lancer dans des calculs compliqués.

La formation d'ingénieur a le mérite au surplus de leur donner un langage commun avec leurs interlocuteurs.

VI. QUELLES MATHÉMATIQUES POUR L'INGÉNIEUR DE DEMAIN par Marc Pélegrin.

1. Un point d'histoire

Lors de mes études à Sup'Aéro, trois prototypes se sont écrasés au premier vol. Dans les 10 dernières années aucun prototype ne s'est écrasé au premier vol, seul un a été détruit au cours des essais en vol durant la phase "d'ouverture du domaine". L'analyse de l'accident a montré que le pilote se trouvait dans une phase de cumulation de forces (ressources avec dérapage si je me souviens bien), non prévue par le calcul.

Je rappelle également que les Américains ont mis un homme sur la lune en 1969 et l'ont ramené sur terre. La puissance des mathématiques est le facteur clé de l'évolution des techniques.

2. Au cours de ma carrière j'ai constaté que ce que l'on utilise bien dans la vie est ce qu'on a appris à l'École et, loin derrière, ce qu'on a appris dans l'enseignement permanent (recyclage). Celui-ci est une condition indispensable pour tout travail d'ingénieur.

3. Avant d'aller plus loin, et puisque l'Ingénieur n'a pas encore été défini ici, j'en donnerai la définition suivante :

C'est une personne qui réalise une idée par action sur la matière dans des conditions de prix et de délais données.

Mots clés : idée, matière, prix, délais.

4. Les mathématiques, base - critiquable - de toute sélection en fin du secondaire, doivent, dans l'enseignement supérieur, être adaptées à la finalité de l'activité future.

Pour l'ingénieur les objectifs me paraissent être :

- a) donner l'esprit de rigueur,
- b) savoir évaluer les erreurs et/ou incertitudes,
- c) avoir toujours en tête "l'approche système",
- d) manipuler avec aisance le domaine stochastique,
- e) être toujours en éveil pour les axes nouveaux.

5. Une partie des enseignements doit rester rigoureuse (théorèmes d'existence, domaine de validité). Ce n'est pas parce que l'ingénieur opère avec des données imprécises qu'il ne doit pas raisonner de façon précise. Insister sur les propagations d'erreurs, notamment en calcul numérique.

Aussi la représentation des systèmes physiques (notamment dynamique en mécanique) doit-elle être enseignée et expliquée de façon rigoureuse. Par exemple : différences entre les représentations "équations différentielles", "fonctions ou matrice de transfert", "représentation d'état" ; ces représentations font apparaître certains modes (la représentation d'état les fait tous apparaître) : il faut expliquer pourquoi au futur ingénieur. L'ingénieur doit comprendre. Autre exemple, l'ingénieur doit savoir jusqu'où des approximations sont valables, en particulier celles qui concernent la rigidité des systèmes. Au fur et à mesure que ses connaissances alliées au développement des moyens de calcul se développent, la prise en compte des déformations structurelles doit s'introduire normalement dans l'étude des systèmes (robotique souple).

6. L'approche système, maintenant solidement établie, implique des formes de raisonnement adaptées : recherche de la frontière d'un système (points à impédance nulle), mesure ou observabilité des grandeurs agissantes ; modélisation de l'environnement ; utilisation des formes canoniques, ce qui le conduit tout naturellement à un certain degré d'abstraction, degré qu'il ne doit pas refuser. Cette abstraction est souvent génératrice de généralisation dont il bénéficiera ultérieurement.

L'un des points les plus importants est la notion de robustesse d'une commande (robustesse par rapport à ...), notion liée à la sensibilité aux paramètres. Ces méthodes générales d'étude de la sensibilité doivent être enseignées sans référence à une application particulière (là encore, degré d'abstraction évident).

7. L'ingénieur doit manipuler avec aisance les grandeurs stochastiques car l'univers dont il a à connaître est aléatoire. Si la théorie est simple pour les systèmes linéaires (corrélation, spectres, processus Markoviens, etc ...) elle devient rapidement complexe pour les systèmes non linéaires (surtout si des phénomènes héréditaires - hystérésis par exemple, ou indéterminés - jeux dans un système mécanique par exemple, existent). L'ingénieur d'essais en aéronautique, utilise quotidiennement les techniques stochastiques (essais de flottement de l'A 320).

La modélisation directe d'un système, incluant son environnement, à partir de données stochastiques s'impose.

Les théories relativement récentes (1970) sur la théorie des possibilités devraient entrer dans le bagage de l'Ingénieur, car le monde dans lequel nous vivons est plus du ressort de ces théories que de celles des **probabilités**⁽¹⁾.

8. La rapidité avec laquelle les techniciens progressent fait que l'enseignement continu doit être accepté et pratiqué par tous. Les nouvelles méthodes sont très généralement plus performantes que les anciennes (... il y a quelques exceptions à cette affirmation !). L'ingénieur doit faire effort pour les assimiler. Ex : réglage d'un pilote automatique par placement de valeurs propres et des vecteurs propres, par opposition aux méthodes plus anciennes de marges de gain et marges de phase à partir des fonctions (ou matrices de fonctions) de transfert. Autre exemple : théorie des bifurcations. De l'aspect purement théorique qu'elle avait il y a 10 ou 15 ans elle a donné lieu à des applications très réalistes concernant, par exemple, les écoulements sur une voilure ou un fuselage (transition laminaire-turbulent).

Cet enseignement qui ne peut plus être de type scolaire (âge et expérience acquise des auditeurs) doit faire l'objet d'une attention particulière : sensibilisation aux théories et développements nouveaux, rénovation de l'esprit de rigueur, enseignement comportant des exercices et travaux personnels (adaptés au type de population concerné).

(1) la somme des possibilités de 2 évènements exhaustifs n'est plus égale à 1

Mais le "recyclage" en mathématiques est certes plus délicat que les recyclages dans des domaines appliqués. Sa mise en oeuvre est plus difficile. Il est nécessaire que les applications apparaissent à chaque pas de l'enseignement car l'Ingénieur en cours de recyclage est, en général, moins friand d'abstraction que l'élève.

9. Quant au dernier point mentionné ("être toujours en éveil" ...) il est tellement évident pour l'Ingénieur que je me bornerai à souligner que les mathématiques, sinon dans leur contenu, mais au moins dans leur forme, évoluent constamment et que, par conséquent, l'éveil de l'Ingénieur pour les Mathématiques doit être soigneusement entretenu.

VII. DISCUSSION

Les différents exposés ont suscité des questions variées de la part des assistants à la table ronde. Les réponses apportées ont été souvent incluses dans les versions actualisées des exposés des intervenants. Nous donnons ci-dessous une rapide synthèse des points originaux soulevés lors de cette discussion. A la question de savoir si la "taupe" ne tuait pas la curiosité des étudiants et leur désir d'approfondir ultérieurement leurs connaissances en mathématiques, D. Gourisse répond qu'il lui paraît déraisonnable de maintenir un programme unique pour tous les taupins, et qu'une voie à explorer est de tendre vers une plus grande diversification des enseignements de mathématiques dès la taupe. C. Deschamps rappelle néanmoins la nécessité de maintenir un noyau dur de mathématiques en classes préparatoires, et M. Pélegrin précise qu'il lui semble difficile de commencer une initiation à la recherche, même très modeste, à ce niveau.

A propos des questions portant sur la forme de l'enseignement des mathématiques dans les Grandes Ecoles, et sur la possibilité de dégager un noyau commun de tout ce qui est indispensable à la formation des ingénieurs, P. Champsaur souligne qu'il ne lui paraît pas possible de définir les connaissances globales qu'un ingénieur doit posséder. Il prend comme exemple l'ENPC où 28% des élèves sont recrutés par des banques ou des organismes de conseil en gestion, soit à peu près autant que par les secteurs qui constituaient les débouchés traditionnels des Ponts et Chaussées. D. Gourisse suggère de structurer l'enseignement des mathématiques en un tronc commun de culture mathématique générale, et des enseignements optionnels finalisés avec un développement parallèle de la formation continue. Dans tous les cas, les mathématiques doivent s'insérer dans un projet pédagogique

global par essence pluridisciplinaire. B. Mercier et M. Pélegrin soulignent que la formation des ingénieurs doit privilégier l'approche système qui suppose une imbrication de diverses disciplines et de divers aspects des mathématiques en particulier.

Aux questions tournant autour de la formation permanente en mathématiques, M. Pélegrin note avec force qu'il s'agit là d'un enjeu important et que cet enseignement doit être systématiquement développé pour permettre aux ingénieurs d'avoir accès à des méthodes mathématiques toujours plus performantes. Néanmoins, cet enseignement lui apparaît délicat à organiser surtout en mathématiques : c'est un problème sur lequel Universités et Grandes Ecoles se doivent de réfléchir et proposer des solutions.

Enfin, un dirigeant d'une société de services en informatique pose la question de savoir où l'on forme les architectes dont l'industrie du logiciel a besoin, et souligne la nécessité impérieuse de former des ingénieurs dans ce domaine.

En guise de conclusion, la table ronde a permis en particulier de mesurer la diversité des mathématiques désormais indispensables à la formation des ingénieurs : elles allient les mathématiques appliquées déjà "traditionnelles" comme les Probabilités et Statistiques, le Calcul Scientifique et l'Automatique, à des mathématiques parfois beaucoup plus pures (l'Analyse pour le Calcul Scientifique, la Géométrie et le Calcul formel pour le CAO et la robotique, l'Algèbre et la Logique pour l'informatique ...). Les mathématiques demeurent plus que jamais une composante fondamentale de la formation des ingénieurs. La table ronde a également mis en lumière la nécessité qu'il y avait de rapprocher l'enseignement des mathématiques de leurs applications, afin de mieux souligner leur imbrication avec les autres disciplines et de créer une réelle motivation chez les étudiants. Enfin, elle a mis en évidence la nécessité d'organiser sans retard la formation permanente en mathématiques pour les ingénieurs.