



La formation mathématique des ingénieurs

par Bernard Beauzamy
PDG, Société de Calcul Mathématique SA

Exposé, INSA de Lyon, 28 juin 2006

La France a une longue tradition de bons ingénieurs. Quand on tourne le bouton, l'électricité est là ; elle est de bonne qualité et de prix raisonnable. Chez nous, dans l'ensemble, les bâtiments tiennent et les appareils fonctionnent ; les lettres, les trains, les avions, partent et arrivent à l'heure.

La pression sociale pour cette exactitude est très forte. Chose amusante, elle est totalement factice : il n'y a rien dans nos vies qui ne puisse s'accommoder de vingt minutes de retard. Telle mégère, dont le ménage n'est pas fait, dont la cuisine est sale, dont les enfants vadrouillent, dont l'employeur fulmine, se répand en récriminations parce que son train a dix minutes de retard. Elle en a le droit ; comme disait Boileau "C'est un droit qu'à la porte on achète en entrant"; ici en prenant son billet. Ne nous en plaignons pas : la pression sur les ingénieurs est salutaire.

Il suffit de se promener un peu partout dans le monde pour voir que, globalement, les choses sont pires ailleurs.

C'est vrai, bien sûr, en Afrique ou en Asie, où les infrastructures laissent à désirer, mais ce l'est même aux USA, pays développé. Les autoroutes américaines sont moins bien entretenues que les nôtres et, en cas de chute de neige, les engins de nettoyage mettent plus de temps à arriver, même sur autoroute et même à proximité de Washington DC : je puis en témoigner personnellement.

Ce bon fonctionnement global tient au fait que, dans l'ensemble, nos ingénieurs sont bien formés. Le système de formation a mis plusieurs siècles à s'élaborer : c'est, pour l'essentiel, celui des Grandes Ecoles. Les mathématiques enseignées sont évidemment des "mathématiques pour l'ingénieur".

La question à laquelle on me demande aujourd'hui d'apporter ma contribution est celle-ci : l'enseignement de ces mathématiques pour ingénieur doit-il être fait par des praticiens, des ingénieurs (et donc être vu comme essentiellement pratique) ou bien être fait par des universitaires (et donc être vu comme essentiellement théorique) ?

Cette question ne me paraît pas bien posée. Présentée ainsi, elle reflète surtout des intérêts catégoriels : les universitaires, dont les filières scientifiques souffrent actuellement de désaffection, voudraient bien pénétrer le système de formation des Grandes Ecoles, où les étudiants forment un flux plus permanent et plus homogène. Comme l'attractivité de leur offre est faible, ils se parent du drapeau de la science et de la recherche.

A mon avis, n'importe qui peut participer à la formation des ingénieurs, s'il a quelque chose à y apporter. Ce peut être un juriste, qui viendra parler du code du travail, ce peut être un médecin, qui viendra parler des risques sanitaires, ce peut être un sociologue, qui viendra parler d'aménagement du territoire, ce peut même être un mathématicien, qui viendra parler...de quoi, au juste ?

1. Qu'apportent les mathématiques aux ingénieurs ?

On entend un peu partout les universitaires parler de l' "efficacité" des mathématiques ; selon eux, elles sont partout. Il est tout à fait exact que tout appareil, toute organisation, comporte une part de mathématiques. Mais pour l'essentiel, il s'agit de mathématiques anciennes, datant de plus de cinquante ans.

L'apport des mathématiques récentes (les 50 dernières années) consiste en des théorèmes nouveaux et un état d'esprit différent, beaucoup plus axiomatique : c'est ce qu'on appelle le "Bourbakisme". Il n'est pas clair que ni cet état d'esprit, ni ces résultats, contribuent significativement au progrès technique, scientifique, économique, social. La question, en tout cas, mérite d'être posée.

Il n'est pas clair que les mathématiques modernes puissent contribuer significativement à l'organisation sociale dont nous parlions tout à l'heure : les lettres, les trains, les avions.

J'ai eu l'occasion, dans le cadre d'un contrat avec Veolia Transport, de réfléchir à l'organisation d'un réseau de bus : travail d'une effroyable complexité ; le mathématicien ne sait tout simplement pas par quel bout commencer, tant les critères à prendre en considération sont nombreux.

J'ai eu l'occasion, dans le cadre d'un contrat avec le Conseil Supérieur de l'Audiovisuel, de réfléchir à l'organisation du "plan de fréquences" pour la bande FM : quelle fréquence allouer à quel émetteur, en fonction des interférences possibles ? En commençant, nous

nous étions dit : le plan existant est vieux ; avec les outils modernes d'optimisation, nous ferons mieux sans effort. En réalité, nous n'avons même pas réussi à faire aussi bien ; le plan existant a été construit au moyen de critères qui ont évolué avec le temps.

Je n'ai pas eu l'occasion de réfléchir au planning des trains ou des avions, mais si on me le demandait, je ne m'y engagerais qu'avec la plus extrême circonspection, tant il est difficile, sur le terrain, de faire mieux qu'une organisation rodée par plusieurs décennies de pratique.

Sur le papier, bien sûr, tout va toujours très bien. Mais en pratique, il y a toujours des accidents, des retards, des bizarreries : tel véhicule est en panne, tel voyageur est malade, etc. Et la théorie ne s'accommode pas de ces situations, alors que tous les organismes concernés savent y faire face.

Des outils modernes ont été développés ; c'est par exemple le cas des ondelettes, qui sont effectivement utilisées pour la recherche pétrolière. C'est un outil mathématique qui, dans certains cas, améliore la transformation de Fourier, en permettant une meilleure localisation.

Mais les ondelettes ont été inventées par des physiciens, et les applications concrètes ont été faites par des physiciens, tandis que les mathématiciens développaient des considérations abstraites, axiomatiques, théoriques, qui sont restées lettre morte vis-à-vis des applications.

Celles-ci sont du reste moins nombreuses qu'on ne le croit : dans le domaine du radar, par exemple, la transformation de Fourier reste l'outil prépondérant, alors que, dans les années 70 chacun pensait (moi inclus) qu'elle serait bientôt reléguée aux oubliettes avec l'apparition des ondelettes.

Il convient donc, lorsqu'on s'intéresse aux applications pratiques des mathématiques (et notamment, bien sûr, aux applications industrielles) d'être à la fois modeste et circonspect. La plupart des problèmes que nos sociétés résolvent de manière empirique depuis des siècles ou des millénaires (comme par exemple l'organisation des transports) ne sont pas à la portée de nos mathématiques.

Cela ne signifie pas, bien sûr, que les modèles mathématiques ne puissent pas jouer un rôle, et que nous soyons à jamais condamnés à des formules empiriques. Mais il ne me paraît pas clair qu'un mathématicien universitaire, qui n'a jamais vu un contrat de sa vie (et ce depuis trois générations), qui croit qu'il est là pour "démontrer des théorèmes", qui fonde son existence sur l'abstraction et l'axiomatique, puisse valablement contribuer à la formation des ingénieurs.

Il devra tout d'abord mener sa propre "révolution culturelle" : avant d'enseigner, il faut apprendre, et pour apprendre, il faut pratiquer. Et pour pratiquer, il devra d'abord mener sa propre "révolution idéologique". Peu d'universitaires ont compris que 75% des salariés travaillaient pour le secteur privé ; pour eux, un bon étudiant se destine à la recherche, et les universitaires ne conçoivent la recherche que publique. Les entreprises ne

leur inspirent que méfiance, souvent au travers d'une idéologie politique qui ne subsiste que dans ces corporations.

Prenons un exemple concret et amusant : les universitaires n'aiment pas les logiciels de Microsoft, parce qu'ils sont issus d'une entreprise privée (et donc qu'ils sont payants par l'utilisateur). Ils leur préfèrent, traditionnellement, les logiciels "gratuits" (c'est-à-dire payés par le contribuable sur son impôt). Mais nous, à l'inverse, tous nos clients nous demandent des rapports écrits au format "Word", qui est un standard du marché.

A la question posée sous cette forme : les mathématiciens universitaires peuvent-ils participer à la formation des ingénieurs ? la réponse appelle les plus extrêmes réserves : oui, s'ils se décident à savoir de quoi ils parlent, oui, quand ils auront décidé d'accepter la présence des entreprises.

Ces réserves faites, on trouve déjà des évolutions tout à fait significatives. Elles sont pour le moment rares et localisées, mais elles sont encourageantes, car elles montrent qu'une formation aux mathématiques est possible et donne accès au monde du travail. L'Université de Bretagne Sud, à Vannes, a mis en place un DESS (maintenant Master Pro) intitulé "Modélisation, Simulation, Optimisation", il y a quelques années, et dès la première promotion les étudiants ont trouvé du travail sans difficulté : c'est la meilleure preuve du bien fondé d'une telle formation.

D'autres Universités mettent progressivement en place des "Master Pro", sur le même modèle, si bien que l'évolution se fera tôt ou tard. Quant aux autres, qu'ils reposent en paix : ils ne nous dérangent pas.

2. En quoi peut consister l'enseignement ?

Traditionnellement, un enseignement mathématique part d'un ensemble d'axiomes, et en déduit des résultats. La conséquence est que, en principe, un étudiant en mathématiques est familier de la notion de "domaine de validité" : si on n'est pas dans la situation où l'axiome est satisfait, le théorème ne s'applique pas.

Ceci, pour un ingénieur, est certainement très important : savoir que la formule de calcul est fautive au-delà de telle contrainte, qu'on ne peut prolonger linéairement telle fonction au-delà de telles limites, tout ceci est essentiel pour lui.

On peut évidemment le lui dire et le lui rappeler : bien des calculs se font à la légère. Mais en principe il le sait déjà. Et si le pont, l'immeuble, s'écroulent après construction, c'est en général plutôt par erreur de conception ; on utilisait des formules empiriques avec d'énormes coefficients de sécurité, parce qu'on savait qu'on ne savait pas, et tout d'un coup on y a substitué un modèle, parce qu'on a cru qu'on savait, et poum, tout est tombé.

L'apport de l'axiomatisation, pour les ingénieurs, me paraît faible et souvent malsain ; on confond rigueur et axiomatisation. La nature est trop complexe ; elle ne se laisse pas axiomatiser. Vouloir procéder de cette manière est réducteur : on ne pourra travailler

que lorsqu'on aura le bon système d'axiomes. Mais voilà : on ne l'a jamais. Cela me rappelle un auditeur, lors d'une conférence de biologie mathématique, qui demandait "pouvez-vous définir une cellule ?". Non, je ne sais pas définir une cellule : c'est un nom commode, générique, mal défini, pour quelque chose qui se rencontre dans la nature. De la même façon, je ne sais pas définir un imbécile, mais je le reconnais naturellement pour tel, lorsque j'en vois un.

Pour moi, l'apport essentiel des mathématiques réside dans la gestion des incertitudes. Le mathématicien a capacité et légitimité, à l'intérieur d'un programme industriel, pour passer en revue les différentes étapes, analyser les incertitudes sur chacune et leur propagation tout au long du programme.

C'est d'autant plus utile que ce n'est pas une tâche que les ingénieurs effectuent naturellement. Ils ont tendance à calculer, vite et bien, mais ne sont pas à l'aise avec les incertitudes. Quelques décennies de calcul scientifique, où l'on a insisté sur la vitesse de résolution des problèmes, les ont confortés dans cette impression : le progrès scientifique tient à la rapidité de calcul des machines.

Or ceci est tout à fait inexact. On calcule aujourd'hui plus vite que jamais, mais le progrès scientifique est plus lent et moins bien accepté par la population. On est allé sur la lune dans les années 70 (où les ordinateurs étaient lents) ; on n'y est plus retourné récemment. Les lettres ne sont pas plus rapides aujourd'hui qu'en 1970, ni les trains (sauf les TGV), ni les avions (le Concorde n'existe plus). On vit plus vieux, mais du fait des progrès de l'hygiène et non de la médecine de pointe, qui, elle, utilise du calcul hautes performances. Et, bien entendu, ni la notification des contrats ni le règlement des factures n'ont fait le moindre progrès en cinquante ans.

Réduire la fonction des ingénieurs à une tâche de calcul est donc, à mon sens, une erreur majeure, tant sur le plan scientifique que sur le plan social ; vouloir y faire participer les universitaires par ce biais est donc une erreur double.

Savoir prendre en compte les incertitudes, bien au contraire, correspond à un double besoin :

- Un besoin social, qui se traduit par une attente constante des Autorités de Sécurité : vous nous donnez tel résultat, mais nous voulons un intervalle de confiance ;
- Un besoin scientifique, qui oblige à mettre en place de nouveaux outils.

Ce dernier point est particulièrement intéressant pour les universitaires, à qui il peut fournir à très courte échéance une voie d'accès prometteuse. Il s'agit d'aider les ingénieurs à mettre en place des techniques (souvent probabilistes) qui permettront de calculer, de prévoir, la "dispersion" de résultats possibles autour d'une valeur nominale. Quel est le retard moyen ? à quoi est-il dû ? combien de véhicules sont indisponibles ? pour quelle durée en moyenne ? etc.

La SCM a développé un programme de recherche sur ces questions, la "Modélisation Mathématique Robuste" (en anglais "Robust Mathematical Modeling") ; il est ouvert à tous et les informations le concernant sont disponibles sur notre site web :

<http://www.scmsa.eu/robust.htm>

Nous organisons assez régulièrement des conférences scientifiques sur les divers aspects de ce programme.

De telles orientations de recherche peuvent être pain bénit pour un universitaire, parce qu'il sera utile dès le début, et, au travers de l'analyse des incertitudes, il pourra se familiariser avec un programme qu'il ne connaît pas. Il n'est pas nécessaire d'être un spécialiste du domaine technique concerné. A l'inverse, les industriels peuvent légitimement rechercher une aide pour la mise en place de ces outils, avec lesquels ils ne sont pas familiers.

Il est donc tout à fait possible et tout à fait souhaitable que les universitaires participent de cette manière à la formation des ingénieurs, en leur apportant un état d'esprit qui leur sera utile et des outils scientifiques nouveaux. Je vois là une possibilité de rapprochement entre deux mondes qui ne se parlent guère ; j'espère que les deux sauront la saisir.

Bernard Beauzamy