

1^{ère} matinale de l'innovation



Mathématiques – Technologie clé

31 janvier 2015

Ouverture

Pierre GATTAZ

Président du MEDEF

Merci d'être présents à cette première session des matinales de l'innovation, consacrée aux mathématiques. Je félicite Laurent Gouzènes, président du Comité « Développement et financement de l'innovation » du MEDEF, qui est un acteur clé du dispositif et Gabrielle Gauthey, présidente de la Commission « Recherche et innovation » du MEDEF. Je remercie également Patrick Schmitt, Directeur recherche et innovation au MEDEF, ainsi que Cédric Villani, médaillé Fields, et Claudie Haigneré qui nous font l'honneur de leur présence.

Le projet du Medef consiste à développer la croissance et l'emploi dans notre pays, pour nos enfants et nos petits-enfants. Pour y parvenir, nous avons besoin d'entreprises compétitives et innovantes. Nous avons beaucoup travaillé sur le projet « 2020 Faire gagner la France », que nous avons illustré sous la forme d'un arbre, le feuillage correspondant aux relais de croissance, le tronc aux entreprises et le terreau à la compétitivité et à l'attractivité que doivent encourager nos élus, le tout s'inscrivant dans un environnement de confiance grâce à la simplification du système social et fiscal. Le MEDEF représente directement deux de ces quatre parties au travers de ses entreprises, de ses salariés, de ses cadres et de ses chercheurs. La mise en place du terreau de compétitivité et de l'environnement de confiance relève de ceux qui nous gouvernent.

Parmi les relais de croissance qui constituent la priorité de nos entreprises figure le besoin d'équipement du monde entier. 7,5 milliards d'individus ont besoin d'eau, de systèmes de santé, de satellites, d'avions, de voitures, de routes, de trains, de bâtiments et de services. L'Europe est à construire, de même que toutes les filières du futur dans les domaines de la santé, de l'économie des personnes âgées, de la sécurité, de l'agroalimentaire, du tourisme et de la chimie. Le monde numérique également est à développer et constitue une opportunité pour les compétences dont nous disposons en matière de créativité et d'innovation, en mathématiques, en algorithmie et en cryptologie. Le développement de Google et de Facebook illustrent cette révolution en marche. Les nouveaux usages et les nouvelles applications constituent également des outils de compétitivité pour nos entreprises et nos institutions publiques. Le numérique représente donc une opportunité en termes de conquête de nouveaux marchés, de développement de nouveaux outils de productivité et de gestion des relations entre acteurs économiques.

La transition énergétique, le développement durable et la lutte contre le réchauffement climatique constituent également un formidable marché. Là encore, nous disposons de filières d'excellence pour répondre aux besoins de ce marché qui se développe dans le monde entier, aux enjeux du coût de l'énergie et à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre. La réponse à ces besoins nécessite également des modèles mathématiques.

Par conséquent, les mathématiques constituent le fondement de la captation des relais de croissance et de la capacité de nos entreprises et de nos institutions à saisir ces opportunités de croissance, de développement et de création d'emploi. Un autre relais de croissance réside dans l'entreprenariat et nous devons favoriser le développement des start-ups en France pour éviter qu'elles s'exilent dans des pays à l'environnement fiscal beaucoup plus favorable. C'est un sujet



sur lequel nous travaillons beaucoup au Medef pour permettre à nos jeunes de créer des entreprises et de rester en France tout en équipant le monde.

L'épanouissement des hommes et des femmes constitue également un enjeu d'avenir incontournable. L'économie de demain doit être humaine. Le MEDEF est souvent accusé de n'accorder d'importance qu'aux profits et aux dividendes. Nous considérons que l'économie ne peut fonctionner que grâce à la compétitivité, à l'innovation et à la rentabilité, mais dans l'objectif de créer de nouveaux emplois et si possible en France. La création d'emplois est notre réelle obsession.

Une entreprise vit grâce à ses clients, à l'innovation, à l'excellence opérationnelle, à la maîtrise des processus et au management des hommes et des femmes dont elle doit assurer la formation, l'épanouissement et l'employabilité. Il nous appartient d'assurer la montée en gamme de nos entreprises dans chacun de leurs domaines. Les fabricants de voitures allemands ont réussi parce qu'ils ont compris que les 1,2 milliard de Chinois s'apprêtaient à intégrer la civilisation moderne et que les 1 % de plus riches voudraient acheter des voitures haut de gamme. Nous avons mis plus de temps à le comprendre en France. En outre, ce raisonnement s'applique à toutes les filières. Nos entreprises françaises réussissent quand elles proposent des produits de meilleure qualité que les autres, innovants si possible et livrés dans le délai prévu, au prix escompté.

La capacité d'innovation de nos entreprises dépend des mathématiques, de la cryptologie et de l'algorithmie. C'est également le cas de l'excellence opérationnelle, la méthode Six Sigma reposant par exemple sur l'étude statistique des processus de contrôles. Les mathématiques sont donc omniprésentes dans les démarches d'innovation et de différenciation. Nous en avons besoin pour développer de nouveaux produits et services, pour le numérique, pour répondre aux enjeux énergétiques et pour l'excellence opérationnelle de nos entreprises. Les mathématiques doivent aider nos entreprises à livrer leurs produits dans les délais prévus, en réduisant les coûts, les flux et les stocks.

C'est pourquoi nous avons choisi les mathématiques comme thème de cette première matinale de l'innovation. La France possède de nombreux atouts dans ce domaine. La présence de Cédric Villani en est l'illustration. Avec dix médailles Fields, la France est le second pays dans ce domaine derrière les Etats-Unis. Nous possédons une force mathématique dont nous devons optimiser l'utilisation en développant les liens entre nos filières universitaires de mathématiques et le monde de l'entreprise. Le rapprochement entre ces deux univers est nécessaire pour éviter que nos mathématiciens quittent la France et pour leur permettre de mettre leurs compétences au service de nos entreprises. Ils constituent une force et un atout formidables pour la France.

Profitons de cette matinale pour mieux nous connaître et pour voir comment le monde de l'entreprise et celui de la recherche mathématique peuvent s'associer, comment nous pouvons aider des start-ups à se développer à partir de la France, comment inventer les produits et services de demain et comment créer le futur ensemble. En Angleterre, 10 % des emplois sont issus des mathématiques. Il n'y a pas de raison que nous n'obtenions pas le même résultat en France, voire que nous ne le dépassions compte tenu de notre potentiel dans ce domaine. La France fait partie des meilleures nations du monde en matière de mathématiques. Nous disposons donc d'un formidable gisement d'opportunités pour développer une France gagnante, conquérante et enthousiasmante.

Vous êtes chez vous au MEDEF et j'espère que cette matinée sera l'initiatrice d'un rapprochement plus fort entre nos deux mondes.



Introduction : Les matinales de l'innovation

Laurent GOUZÈNES

Président du Comité « Développement et financement de l'innovation » du MEDEF

Les matinales de l'innovation ont pour objectif de stimuler la compétitivité des entreprises par la sensibilisation et la formation, en menant une réflexion collective pour développer des actions. C'est le cas de cette matinée, qui vise à renforcer les liens entre les mathématiques et l'entreprise en France.

Les matinées constitueront des sessions de deux à trois heures composées d'exposés, de réflexions et de temps d'échanges. Elles seront relayées au travers du site mis en place par le MEDEF, « innover-en-France », qui permettra d'annoncer les sessions et d'en diffuser le compte rendu.

Le titre de cette première matinale « Mathématiques – Technologie clé » peut paraître provocateur puisque les mathématiques sont habituellement considérés comme une science et non comme une technologie. Pour beaucoup, les mathématiques sont du chinois. En chinois, 数学 qui se prononce shù xué, signifie « l'étude des nombres ». Les mathématiques vont néanmoins bien au-delà de l'étude des nombres, qui ne constituent qu'un objet mathématique parmi d'autres.

Les mathématiques sont utilisées dans la production et la gestion des appareils et services que nous utilisons quotidiennement. Ils servent dans les domaines des transports, de l'information, de l'agriculture, de la biologie et de l'énergie. Aucun de ces domaines ne serait aussi performant sans l'armée d'outils mathématiques sur lesquels ils s'appuient. Les outils mathématiques sont aussi nécessaires que les autres outils physiques qui permettent leur mise en œuvre.

Les experts de ces domaines ont émis des recommandations au cours de l'étude Technologies clés, réalisée tous les cinq ans en France et qui vise à déterminer les technologies d'avenir dont notre pays a besoin pour développer les technologies et l'emploi. Tous ont souligné l'importance des mathématiques et des algorithmes. Parmi les atouts dont nous disposons, ils ont relevé l'école mathématique française. En revanche, ils se sont inquiétés de la perte de nos capacités en mathématiques.

Les experts considèrent également que les mathématiques appliquées sont essentielles pour les TIX et les systèmes complexes, pour la production d'énergie et l'optimisation des réseaux de transport et pour la santé et la biologie.

Comment développer les atouts de la France dans le domaine des mathématiques ? Est-il possible de mesurer l'importance économique des mathématiques ? Quelles sont nos forces ? Comment développer l'image des mathématiques et la relation aux mathématiques, souvent perçues comme un instrument de sélection à l'école ? Comment développer la formation aux mathématiques et son emploi dans les entreprises ?

Nous avons besoin des mathématiques pour développer les technologies et les produits du futurs.



Mathématiques et entreprises : quelles applications pour les marchés ?

◆ Science, technologie et mathématiques

Alain BRAVO, vice-président de l'Académie des technologies

La technologie est la science des techniques, l'étude des procédés, des méthodes, des instruments ou des outils propres à un ou plusieurs domaines techniques, arts ou métiers. Elle désigne donc un ensemble de sciences et de techniques. C'est pourquoi la question des liens entre la science, la technologie et les mathématiques paraît pertinente.

Je me suis intéressé à la manière dont les mathématiques participent aux défis de l'énergie et j'ai constaté que le département d'énergie des Etats-Unis par exemple mène des recherches dans de nombreux domaines dont la dynamique bio-informatique et biophysique des protéines, la géochimie des argiles, l'imagerie des phénomènes météorologiques, la solidification des alliages de matériaux ou le modèle parallèle du climat. Les mathématiques permettent de comprendre les phénomènes et de décliner de nombreuses applications dans le domaine de l'énergie.

La structure TerraTec créée en 2006 organise chaque année un forum des professionnels du calcul haute performance lors duquel ont été abordés les thèmes du big data, des matériaux, du végétal, de la santé et des systèmes urbains. Cet autre exemple montre comment le calcul scientifique de haute performance participe aux enjeux actuels.

De même, les rencontres Math-Industrie de la Société des Mathématiques Appliquées et Industrielles portent sur l'interaction entre mathématiques et industrie pharmaceutique, sur le calcul haute performance, sur la voile et l'innovation mathématique, sur l'innovation énergétique et sur la fiabilité et la sûreté de fonctionnement.

Il apparaît donc que la question que nous nous posons sur les mathématiques en tant que technologie correspond à une réalité et à un mouvement. Il existe une réflexion permanente sur les moyens d'optimiser l'utilisation des mathématiques pour relever les défis qui se posent à nous.

Nous utilisons des systèmes de plus en plus complexes, voire des systèmes de systèmes, qui nécessitent de maîtriser la modélisation, la simulation, l'analyse des risques et l'anticipation du comportement des systèmes. Il existe donc un très fort besoin d'investissement dans ce domaine.

L'Académie des technologies a pour objet d'analyser l'impact des technologies sur la société. Elle réunit des scientifiques, des ingénieurs, des philosophes, des médecins et des économistes pour établir une vision systémique. Parmi ses membres, nous pouvons citer Jean-Pierre Dupuy et Etienne Klein, qui sont à la fois philosophes et scientifiques et démontrent, comme nous le savons depuis Blaise Pascal, que les mathématiques et la philosophie peuvent être complémentaires.

Le titre de cette matinale, « Mathématiques - Technologie clé », me plaît. Néanmoins, les mathématiques ne sont pas une technologie. Le système éducatif a toujours établi une distinction entre le savoir et les compétences. Pour ma part, je pense que les mathématiques constituent un savoir clé et un moyen puissant pour résoudre les problématiques de systèmes complexes. Les mathématiques doivent donc être traitées comme un savoir. A l'Académie des technologies, nous nous interrogeons sur l'acquisition d'un savoir en technologie. Un avis que nous avons émis il y a

deux ans recommande une approche distinguant les technologies structurelles, les technologies génétiques, qui ont évolué et ont intégré un certain nombre de modernisations, les technologies génériques telles que la biologie de synthèse, qui créent à partir du savoir acquis, et les technologies générales, très systémiques.

Il existe effectivement un lien naturel entre les sciences, les technologies, les mathématiques et le monde des entreprises. Les mathématiques constituent un savoir clé, dans lequel il est important que nous maintenions notre niveau. Après la réforme du lycée de 2010 et son impact sur les enseignements scientifiques, je m'inquiète avec d'autres quant au maintien du niveau de formation de notre pays et plus particulièrement du lien entre les mathématiques, la physique et la chimie. Ce lien est essentiel pour développer une approche systémique.

◆ L'utilisation des mathématiques dans la couverture des risques d'une entreprise

Gabriel GROSS, président de Météo Protect SAS

Météo Protect traite la problématique des impacts de la météo et des anomalies météorologiques sur la vie des entreprises. Nous vivons tous avec la météo, sans avoir conscience de tous ses effets. La révolution de 1789 n'a pas été déclenchée par les inégalités entre les pauvres et les riches mais parce que le peuple n'avait plus de pain en raison des conditions météorologiques particulières de 1788, qui avaient entraîné une récolte de blé catastrophique. Cet exemple montre l'importance des effets de la météo.

Nous avons créé Météo Protect en France il y a trois ans et notre entreprise emploie aujourd'hui une quinzaine de personnes à Paris, Londres et Mumbai. Nous intervenons auprès des clients de toutes les industries, sur trois continents. Notre métier consiste à aider les entreprises à comprendre comment le climat les influence et à gérer ses impacts sur leur activité. Dans tous les domaines et dans tous les pays, les entreprises attribuent une partie de leurs difficultés à la météo. Nous avons donc mis en place un nouveau mode de travail pour gérer ce sujet en nous appuyant sur les mathématiques, essentiellement les statistiques, à partir d'une plateforme scientifique extrêmement solide sans laquelle nous n'existerions pas.

Aider une entreprise à comprendre comment la météo l'influence consiste à formuler une équation dont les inconnues correspondent à des éléments observés dans la nature (météo, rendements agricoles, débit des rivières ou vitesse de la fonte des neiges) et le résultat à un impact sur la performance financière des entreprises au travers du chiffre d'affaires ou du coût de revient des matières premières. Nous traitons ensuite cette équation comme nous suivons l'évolution du coût des matières premières ou du cours des devises et nous créons des outils financiers, principalement des options, souvent traduits en contrats d'assurance. Une entreprise a alors la possibilité d'être indemnisée si la météo lui fait perdre plus de 10 % de son chiffre d'affaires par exemple. Par conséquent, bien qu'étant une petite entreprise, Météo Protect apporte un important changement à ses clients.

L'impact des mathématiques sur la vie des entreprises peut s'illustrer au travers de la variabilité du vent. En France, une part significative de la production d'énergie provient des éoliennes et au Danemark, cette part s'élève à 40 %. Or nos études montrent que la production d'énergie éolienne varie de 10 à 20 % selon les années et ces variations ont un impact sur le coût de l'électricité. La



première phase de notre travail consiste donc à observer comment la météo influence une variable économique. Nous avons tous conscience que la météo est instable et nous percevons depuis une trentaine d'année les effets des changements climatiques.

Une analyse de tendance que nous avons réalisée pour un gazier qui souhaitait comprendre de quelle façon son chiffre d'affaires évolue sous l'effet des températures moyennes sur une saison de chauffe montre que la tendance exprimée varie selon l'algorithme choisi. Le polynôme de premier degré ($y=ax+b$) constitue la première méthode d'analyse des tendances. Actuellement, certaines entreprises prennent des risques météos sur plusieurs milliards d'euros en utilisant un polynôme de premier degré pour caractériser la tendance alors que des modèles plus sophistiqués peuvent indiquer une tendance inverse à celle qui ressort de cette formule basique. Toutes les entreprises utilisent les mathématiques. Néanmoins, sont-elles bien équipées pour les utiliser ? En effet, les prévisions météorologiques nécessitent une analyse plus poussée que celle permise par un polynôme de premier degré.

Une autre thématique de recherche que nous abordons régulièrement consiste à définir le chiffre d'affaires normal d'une entreprise, retraité des impacts de la météo. L'objectif est d'appréhender les marges d'évolution du chiffre d'affaires dans un monde plus ou moins prévisible et d'en tirer les conséquences en termes de gestion du personnel, d'achats et de financements. De nombreuses entreprises se sont trouvées en difficulté pour n'avoir pas effectué ce travail qui consiste à définir la situation normale. La planification dans le temps est également importante pour une entreprise qui vend des crèmes solaires par exemple.

Un exemple simple permet de souligner la nécessaire rigueur que requiert l'utilisation des mathématiques. Il consiste à placer sur un graphique différents pays selon leur consommation de cigarettes et leur espérance de vie à la naissance. En effet, ce graphique semble indiquer que plus la consommation de cigarettes est élevée et plus l'espérance de vie progresse. Cet exemple illustre le principe de la variable cachée, puisque c'est dans les pays d'Europe que l'espérance de vie et la consommation de cigarettes est la plus élevée, sans lien de causalité entre les deux éléments.

De même, un graphique représentant les pays selon leur consommation de café et leur productivité par heure travaillée semble indiquer une corrélation entre les deux éléments parce que les pays les moins productifs sont également ceux dont la population consomme moins de café.

Ces exemples montrent l'importance des mathématiques dans la vie d'une entreprise et la nécessité de les manier avec une grande rigueur.

◆ La conception de l'interface cerveau-machine

Corine MESTAIS, directeur recherche Clinatec (Centre de recherche biomédicale Edmond J. Safra) - CEA

Le Clinatec, hébergé par le CEA de Grenoble, développe un projet très ambitieux d'interface entre le cerveau et la machine au service des sujets tétraplégiques. Ce projet est dirigé par le professeur Al Benabid, qui a été récompensé par le prix Lasker en 2014 pour ses travaux sur la simulation cérébrale profonde.

Le Clinatec regroupe en un même lieu une équipe pluridisciplinaire de médecins, technologues, ingénieurs, biologistes et mathématiciens pour accélérer le développement des dispositifs

médicaux et leur preuve de concept chez l'homme. L'objectif est de rendre fonctionnel en clinique un appareil qui fonctionne en laboratoire. L'enceinte de Clinatéc comporte un secteur clinique avec un bloc opératoire et des chambres. Le laboratoire travaille en partenariat avec l'hôpital de Grenoble, l'Université Joseph Fourier et l'Inserm. Il développe des innovations dans le domaine des maladies neurodégénératives, du cancer et du handicap.

Le projet d'interface cerveau-machine s'adresse aux sujets tétraplégiques, incapables de mouvoir leurs bras et leurs jambes à cause d'une lésion de la moelle épinière alors que leur cerveau est intact. Une mesure suffisamment précise de l'activité cérébrale doit leur permettre d'activer un exosquelette ou d'autres effecteurs pour retrouver de la mobilité et améliorer leur qualité de vie dans la mesure du possible. Le patient imagine le mouvement, un implant mesure son activité motrice et les algorithmes permettent d'extraire l'information pertinente, de prédire l'intention de mouvement et de la convertir en commande pour activer l'exosquelette. L'interface cerveau-machine repose sur le paradigme selon lequel imaginer un mouvement entraîne dans le cortex moteur une activité très proche de celle qui se produit quand le mouvement est réellement effectué. Nous avons donc développé une méthode pour mesurer cette activité.

Depuis l'existence des électroencéphalographes, des recherches sont menées sur le pilotage d'effecteurs et la coupe du monde au Brésil a été ouverte par un sujet paraplégique équipé d'un casque EEG qui a donné un coup de pied dans le ballon. Cet événement a été rendu possible par l'équipe du professeur Miguel Nicolelis, qui est un pionnier dans le domaine des interfaces cerveau-machine. Dans ce cas néanmoins, l'activité est mesurée à partir du scalp de la personne, les signaux provenant du cortex sont atténués par l'os et de nombreuses informations spatiales et fréquentielles sont perdues. Le casque EEG ne permet d'activer qu'un ou deux degrés de liberté, tel un interrupteur qui déclenche le mouvement.

L'équipe de Brown University a publié en 2006 dans Nature les résultats de ses travaux qui ont permis à un sujet tétraplégique d'activer un curseur sur un écran ou de boire une cannette en activant un bras robotisé grâce à une matrice d'électrodes de 5 millimètres de côté qui pénètre à l'intérieur du cortex moteur pour y mesurer l'activité. Néanmoins, ce système est invasif et sa stabilité au cours du temps n'est pas garantie car le cerveau est mouvant. Par conséquent, cette méthode ne peut être appliquée en dehors d'un laboratoire.

Le professeur Al Benabid a donc cherché une solution intermédiaire en plaçant les capteurs à la surface du cortex. Son système est également invasif mais ne pénètre pas à l'intérieur du cerveau. Il consiste à utiliser, pour mesurer l'activité corticale des sujets tétraplégiques, une matrice d'électrodes identiques à celles qui servent à effectuer le diagnostic pré-chirurgical de l'épilepsie. Deux implants communiquent l'information cérébrale par une liaison sans fil à une plateforme logicielle qui l'interprète en temps réel pour piloter l'effecteur. C'est à ce niveau qu'interviennent les mathématiques.

Ce dispositif résulte donc d'un mariage étroit entre l'évolution des technologies d'ingénierie et les algorithmes. L'implant se loge dans la boîte crânienne pour minimiser les risques chirurgicaux. L'antenne est glissée entre l'os et la peau et la plaie est refermée. La face interne de l'implant comporte 64 électrodes situées au regard du cortex moteur. Les signaux sont amplifiés et transmis au logiciel pour analyse. Il s'agit donc d'un dispositif médical implantable actif qui satisfait à toutes les normes des directives européennes sur l'implantation chronique à long terme. Les tests normatifs sont en cours de finalisation par des laboratoires certifiés.



La conception de la plateforme logicielle, réalisée sous la direction de Tatiana Aksenova, a débuté par la création d'un modèle qui consiste en une équation traduisant les données spatiales, temporelles et fréquentielles produites par le cerveau pour effectuer une prédiction de mouvement et activer l'exosquelette. Le modèle est donc calibré à partir d'intentions de mouvement connues et comporte 1 million de variables.

L'équipe de Tatiana Aksenova a adapté des algorithmes existants pour réduire les dimensions du tenseur, pour améliorer la vitesse afin de permettre un fonctionnement en temps réel, pour assurer la sélection des informations les plus pertinentes et pour constituer un système robuste et sensible aux artefacts. Ses travaux ont donné lieu à plusieurs dépôts de brevet, l'objectif étant de créer des solutions et des marchés.

Nous finalisons actuellement le dossier qui sera soumis à l'Agence Nationale de Sécurité du Médicament pour obtenir l'autorisation de lancer les essais cliniques. Sur le plan de la recherche technologique, nous avons franchi les étapes de spécification du démonstrateur et disposons d'un prototype pour les essais cliniques. La prochaine étape réside dans les preuves de concept chez l'homme, en priorité pour les sujets tétraplégiques et le handicap moteur sévère et potentiellement pour la réhabilitation post-accident vasculaire cérébral. En effet, cette technologie pourrait aider les patients à retrouver leurs mouvements en stimulant leur plasticité cérébrale. Parallèlement, nous commençons à instruire un transfert de technologie pour que le système puisse bénéficier au plus grand nombre de patients.

Nous avons donc élaboré un dispositif médical innovant, issu des micro-nanotechnologies, qui permet d'accéder à des données cérébrales inaccessibles jusqu'à présent. Les algorithmes originaux permettent d'extraire des informations pertinentes en temps réel grâce à un modèle mathématique basé sur le machine learning, qui ouvrira de nouvelles applications et répondra à de nouveaux usages. L'objectif de la preuve de concept de cette interface cerveau-machine est d'apporter de nouvelles solutions pour de nouveaux marchés.

Par ce projet, le laboratoire Clinatec montre sa capacité à mener sur un seul lieu l'étude, le développement et la validation de projets très pluridisciplinaires, intégrant les technologies et les mathématiques dans un système. L'équipe de ce projet comporte des électroniciens, des informaticiens, des micro-nanotechnologues, des mathématiciens, des roboticiens et des personnels médicaux. Elle est financée principalement par le CEA et bénéficie du mécénat de la fondation Safra et du soutien de l'ANR au travers de l'Institut Carnot, de la Fondation de l'Avenir, de la Fondation Motrice et de la Fondation Nanosciences.

Pour améliorer les liens entre les mathématiques et le monde de la recherche et de l'industrie, il convient de favoriser l'enseignement multidisciplinaire, de conjuguer les domaines, d'offrir des spécialisations de biologie, de chimie, d'économie et d'ingénierie dans le cursus de formation des mathématiciens et réciproquement et d'intégrer les spécialistes des mathématiques aux équipes de recherche pour favoriser les échanges. Dans le cadre du projet d'interface cerveau-machine de Clinatec, qui a démarré en 2008, deux années ont été nécessaires pour que les historiens, les mathématiciens, les informaticiens, les électroniciens et les médecins partagent le même langage.

Enfin, il conviendrait de réaliser des appels à projets multidisciplinaires de manière à stimuler les rencontres entre chercheurs.

Mathématiques et économie : quelles perspectives pour l'emploi ?

Stéphane CORDIER, directeur de l'AMIES (Agence pour les Mathématiques en Interaction avec l'Entreprise et la Société)

Les mathématiques constituent avant tout une discipline. Néanmoins, les mathématiciens sont pour la plupart satisfaits d'être reconnus comme des acteurs de croissance et d'innovation et ne sont donc pas choqués que les mathématiques soient considérées comme une technologie. Les mathématiques sont d'autant plus stratégiques depuis la révolution numérique. Elles sont omniprésentes tout en étant relativement invisibles. Nous pouvons considérer qu'elles constituent l'oxygène du monde digital, étant indispensables à la vie des technologies numériques.

Mon exposé porte principalement sur les docteurs en mathématiques, puisque ceux sont eux qui effectuent des travaux de recherche et qui participent à l'innovation. Nous disposons par ailleurs en France de formations d'excellence conduisant au master ou au diplôme d'ingénieur. L'Agence pour les Mathématiques en Interaction avec l'Entreprise et la Société est financée par le programme Investissements d'avenir, sous la tutelle du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), de l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria) et de l'Université de Grenoble. Elle intervient au niveau national dans l'objectif d'améliorer l'image des mathématiques et de renforcer les liens entre les entreprises et les laboratoires de recherche en mathématiques. Il convient notamment de sensibiliser les entreprises au besoin croissant en mathématiques.

La communauté mathématicienne française comprend 4 000 docteurs mathématiciens répartis dans 55 laboratoires de manière relativement uniforme sur le territoire. Par ailleurs, 500 docteurs sont formés chaque année. 6 % des thèses réalisées dans le cadre du dispositif CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche) le sont par des mathématiciens. L'école mathématique française est la deuxième en matière d'excellence derrière les Etats-Unis et la première en nombre de récompenses rapporté à la population. La sélection française à la dernière édition du Congrès international des mathématiciens, qui se réunit tous les quatre ans pour décerner les médailles, représentait 20 % du total des sélectionnés. Elle se composait de mathématiciens en poste en France ou ayant effectué leurs études en France. Il existe un équilibre entre les mathématiciens formés à l'étranger et en poste en France et ceux qui quittent la France après leur formation.

La communauté mathématique française est organisée autour d'un réseau complexe de sociétés savantes et de fondations. L'AMIES a donc été créée pour faciliter l'accès des entreprises aux mathématiques.

◆ L'impact socio-économique des mathématiques

Une étude réalisée en 2012 en Angleterre par le cabinet Deloitte sur l'impact de la recherche en mathématiques en termes d'emploi et de création de valeur montre que 10 % des emplois sont directement liés aux mathématiques et utilisent principalement les techniques mathématiques, représentant 16 % de la valeur ajoutée brute en Angleterre, avec une productivité moyenne de



74 000 livres pour les emplois concernés contre 36 000 livres sur l'ensemble de la population. La même étude réalisée en 2014 aux Pays-Bas donne des résultats similaires. L'AMIES a commandité pour la France une étude de même nature au cabinet CMI, qui devrait livrer ses résultats en mai 2015.

Nous travaillons également à la rédaction d'un livre blanc piloté par la société de capital-risque Aremus avec BpiFrance et l'ANR. Nous essayons dans ce cadre de mesurer les opportunités d'affaires, en particulier pour les PME et les ETI, liées à l'utilisation de modélisations, de simulations ou d'optimisations. Ce document paraîtra en avril 2015 et comportera des exemples pour illustrer l'impact de l'utilisation de techniques innovantes dans tous les secteurs de l'économie.

Le time to market des mathématiques s'est considérablement raccourci. La théorie des opérateurs a été utile à la mécanique quantique, qui s'applique aujourd'hui au travers des nanotechnologies. De même, les géométries non euclidiennes du XIXe siècle trouvent leur application économique dans les GPS. En revanche, Alan Turing a rapidement rendu effectifs ses résultats sur les cryptographies utilisées par le régime nazi pendant la Seconde Guerre mondiale. Enfin, Google transforme de plus en plus rapidement les algorithmes en nouveaux services.

◆ Les emplois liés aux mathématiques : explosion de la demande

Une étude réalisée par le cabinet Adoc, spécialisé dans le recrutement des docteurs, montre que 94 % des docteurs diplômés en mathématiques en 2013 en Ile-de-France avaient trouvé un emploi moins de six mois après leur thèse, contre 79 % pour l'ensemble des docteurs. 60 % des docteurs en mathématiques trouvent un emploi avant leur soutenance contre 45 % pour l'ensemble des docteurs. 70 % d'entre eux sont satisfaits de leur emploi. La plupart cherche un emploi dans la recherche et le développement ou s'oriente vers le milieu public. Ceux qui choisissent le privé perçoivent un salaire médian plus élevé de 7 000 euros que la moyenne.

Par ailleurs, une étude américaine publiée par CareerCast en décembre 2014 place le métier de mathématicien au premier rang avec un taux de croissance attendu de 23 % dans les huit prochaines années aux Etats-Unis, devant ceux de professeur des universités, de statisticien et d'actuaire, métiers également en rapport avec les mathématiques.

L'AMIES publie sur son site les offres d'emploi visant les mathématiciens et les transmet à la très large majorité des diplômés en mathématiques au niveau national. Le cabinet Adoc confirme une explosion de la demande, en particulier s'agissant des data scientists, chargés de la gestion et de l'analyse des big data. Les étudiants de niveau master ou issus d'école d'ingénieur sont extrêmement bien positionnés sur le marché de l'emploi.

Par ailleurs, il ressort du forum IncubAlliance que les études en mathématiques présentent des opportunités en termes d'optimisation fiscale. Il existe un fort mouvement de création de start-ups par des mathématiciens.



◆ L'AMIES : un trait d'union entre mathématiques et entreprises

L'AMIES s'inscrit au service des entreprises, avec un certain nombre d'outils tels que l'aide à l'amorçage, des opérations visant à établir le contact entre les doctorants et les entreprises, un forum Emploi-Maths programmé pour 2016 et la participation à de nombreux événements.

Les entreprises qui auraient déjà identifié les mathématiques comme une discipline stratégique et qui emploieraient des mathématiciens ont la possibilité de sponsoriser une brochure qui sera diffusée dans la France entière sur les métiers des mathématiques et de l'informatique. Il est possible d'y présenter le portrait de l'un de vos collaborateurs.

Par ailleurs, dans le cadre du programme « Les maths, ça sert » géré par la fondation Animath, nous recherchons des personnes pour intervenir dans les écoles et promouvoir une nouvelle image des mathématiques auprès des enseignants, des élèves et de leurs parents.

S'agissant des mathématiques à l'international, vous pouvez télécharger le rapport du FLMI intitulé « European Success Stories in Industrial Mathematics ». Par ailleurs, nous avons créé le réseau EU-Maths-In pour promouvoir les mathématiques comme domaine stratégique auprès des instances dirigeantes de l'Union Européenne. Maria Esteban assurera la présidence française de l'International Council for Industrial and Applied Mathematics à partir de juin 2015. Enfin, nous sollicitons le soutien des entreprises et du MEDEF à la candidature française pour l'organisation de l'édition de 2022 du Congrès international des mathématiciens.



Mathématiques et société : quelles orientations pour les politiques

◆ La place et la perception des mathématiques dans la société

Cédric VILLANI, professeur à l'Université Lyon 1, directeur de l'Institut Henri Poincaré, médaille Fields 2010

Tout a son importance et tout est dans les détails. Les incitations fiscales constituent une bonne mesure si elles sont utilisées par les entreprises pour embaucher des mathématiciens. En revanche, il n'est pas bon qu'elles les détournent en requalifiant une partie de leurs activités existantes en recherche mathématique pour optimiser leur fiscalité. Ces aides font donc l'objet de débats au sein de la communauté scientifique, qui se demande si l'impact est plus élevé dans la première que dans la seconde catégorie.

De même, ayant entendu que les mathématiques constituent un enjeu stratégique important pour le pays, un représentant très zélé d'un ministère s'est mis en tête de sécuriser ces zones d'intérêt stratégique et a imposé aux laboratoires de mathématiques des règles de sécurité si drastiques que l'ensemble des directeurs de ces laboratoires a envisagé sérieusement la démission collective. Ce conflit se poursuit aujourd'hui entre la communauté scientifique et l'organisation gouvernementale. Les détails sont donc importants et des mesures exagérées peuvent provoquer des effets inverses à ceux escomptés.

Les mathématiques ne sont considérées comme un métier d'avenir que depuis récemment. C'est en 2009 que le Wall Street Journal a conclu que le métier de mathématicien était le plus porteur. Par ailleurs, l'étude de CareerCast qui classe les métiers de mathématicien, d'actuaire et de statisticien parmi les quatre plus porteurs date de 2014.

Le Wall Street Journal définit le mathématicien comme un professionnel qui applique des théories mathématiques et des formules pour enseigner ou pour résoudre des problèmes. Il n'est pas gênant de qualifier les mathématiques de technologies. Au-delà d'un savoir, les mathématiques constituent un état d'esprit et un ensemble de démarches utilisé pour résoudre des problèmes, en particulier lorsqu'il est nécessaire de créer un nouveau modèle. Les modèles et les simulations font partie de l'arsenal mathématique et constituent une technologie.

Le cœur artificiel du professeur Alain Carpentier par exemple s'appuie sur de nombreuses technologies, y compris les mathématiques, nécessaires notamment pour calibrer les algorithmes et pour établir le lien entre la mesure des signaux biologiques et la réponse à apporter. Les mathématiques sont généralement associées à tout ce qui relève de l'information. Elles sont nécessaires pour la transmission, le calcul ou l'ajustement d'informations. Tout système complexe induisant des échanges d'informations et de données, des mesures et des réponses à apporter, éléments ne relevant pas directement du domaine physique, utilise les mathématiques. Les mathématiques sont universelles et ont été conçues pour résoudre des problèmes de toute nature, en biologie ou en physique. De par leur caractère abstrait, elles peuvent s'appliquer à tout sujet. Elles ne résolvent pas tous les problèmes mais possèdent la capacité de s'adapter à toute question.

De ce point de vue, nous vivons dans un monde pleinement mathématique. De très nombreuses inventions technologiques devenues familières reposent sur des problèmes mathématiques anciens et sur des théories nouvelles, issues de l'ensemble de la communauté des mathématiciens, en collaboration avec des ingénieurs et des physiciens.

Au début du XIXe siècle, Pierre-Simon de Laplace a été le premier à démontrer que la loi normale, qualifiée improprement « loi de Gauss », intervient dans tout contexte pour modéliser des erreurs. Ce théorème, qui est probablement l'un des plus marquants de toute la mathématique, est utilisé dans tous les domaines. Alan Turing, qui a décrypté les messages de la machine Enigma utilisée par les nazis, constitue l'un des symboles de la puissance des mathématiques. Il a joué un rôle majeur durant la Seconde Guerre mondiale, ayant permis à lui seul d'éviter des millions de morts. Il a également contribué de manière primordiale à notre développement technologique, ayant été le premier à imaginer ce que serait un ordinateur. Il illustre également les difficultés du créateur qui s'attaque à des problèmes technologiquement importants, avec une vision à long terme. Ce n'est pas un hasard qu'Alan Turing soit aujourd'hui célébré comme un héros dans un monde où l'ordinateur est omniprésent.

Les applications les plus fréquentes des mathématiques concernent les téléphones portables et autres instruments de communication et les outils de traitement de l'image. Les productions cinématographiques également utilisent très largement les mathématiques.

La révolution digitale

La révolution digitale est souvent illustrée par l'image de Steve Jobs ou du « bidouilleur » qui surfe sur une idée géniale. C'est oublier que cette révolution est rendue possible par la science lourde et par les travaux d'Alan Turing et de tous ceux qui ont développé la mécanique quantique. Les nouvelles inventions résultent souvent d'un assemblage entre la science lourde, inscrite sur une longue durée, portée par des moyens colossaux, souvent collectifs et internationaux, et une part de bidouillage.

L'utilisation des mathématiques produit des résultats depuis au moins Eratosthène avec la mesure de la circonférence de la Terre. De même, les mathématiques ont permis de réaliser des pendules oscillants et de mesurer le temps de manière extrêmement précise au XVIIe siècle. L'utilisation des mathématiques pour résoudre des problèmes n'est pas nouvelle. La nouveauté réside dans l'ampleur et la rapidité du phénomène. La rapidité de traitement, la vitesse des évolutions, la complexité et la longueur des chaînes impliquées et les volumes traités augmentent de manière phénoménale. Par ailleurs, l'informatique permet d'appréhender un domaine de manière globale. Avant l'informatique, les mécanismes et les technologies se limitaient à une question particulière. L'informatique en revanche a été conçue pour pouvoir gérer n'importe quel problème.

Entre les ordinateurs du milieu du XXe siècle et ceux que nous utilisons aujourd'hui, nous avons effectué un gain de puissance de l'ordre de 1 000 milliards. C'est l'évolution la plus rapide qui se soit produite dans toute l'histoire humaine. La révolution numérique est donc supérieure à toutes les autres révolutions scientifiques en termes de vitesse, d'ampleur et de changement d'habitudes. Le numérique s'impose à nous à chaque instant, au point que nous avons parfois l'impression d'en être esclaves et qu'il entraîne des difficultés de concentration. Le numérique



implique également une évolution à marche forcée des pratiques des entreprises, obligées d'automatiser et d'informatiser leurs processus pour maintenir leur compétitivité.

Comme les autres révolutions technologiques, la révolution numérique entraîne un bouleversement des métiers. De nombreux métiers qui seront exercés par nos enfants n'existent pas encore. La révolution numérique provoque également une redistribution des cartes géostratégiques.

L'évolution de la pratique scientifique

Le métier de mathématicien a évolué et comporte beaucoup plus de tâches de haut niveau consistant à gérer des systèmes, voire des systèmes de systèmes, tandis que les mathématiciens passent désormais beaucoup moins de temps à calculer des formules et à résoudre des équations. Le métier de mathématicien est donc moins centré sur le savoir et davantage sur le savoir-faire requis pour dialoguer avec la machine.

La gestion de la science a également fortement évolué, devenant de plus en plus coopérative, interdisciplinaire et entrepreneuriale, avec un poids des financements sur projet de plus en plus important. Par ailleurs, les réformes de l'enseignement général se succèdent partout dans le monde. Enfin, il règne une compétition internationale massive. Le salaire d'un mathématicien varie d'un à trois ou quatre entre la France et les Etats-Unis. Le système éducatif américain est plus interdisciplinaire que le système français mais c'est en France et dans d'autres pays que les Etats-Unis recrutent leurs mathématiciens. Le système d'éducation américain produit relativement peu de chercheurs.

La science est parfois perçue par le public comme une démarche rationnelle consistant à appliquer un savoir pour obtenir une solution. Dans les faits, la recherche constitue un processus extrêmement chaotique et imprévisible, marqué par des difficultés d'instruments, de nombreux allers et retours et la découverte de formules que l'on croit géniales avant de s'apercevoir qu'elles ont déjà été découvertes par d'autres. Les mathématiques sont donc stratégiquement importantes et vitales pour l'économie mais personne, y compris parmi les mathématiciens, n'est en mesure d'expliquer précisément comment fonctionne une recherche mathématique efficace. La recherche mathématique nécessite une approche écosystémique et appelle de nombreux essais qui aboutissent souvent à des erreurs.

Le processus d'innovation nécessite sept ingrédients majeurs dont la documentation ou le savoir. Le second ingrédient, la motivation, le plus important et le plus mystérieux, est également le plus problématique. En effet l'effectif des nouveaux diplômés est plus bas que jamais alors que les besoins en mathématiciens n'ont jamais été aussi importants et toutes les mesures politiques adoptées au cours des dernières décennies pour enrayer cette baisse n'ont eu au mieux qu'un effet marginal. Le processus d'innovation requiert également des échanges et un environnement favorable. Certains pays très riches tels que l'Arabie Saoudite ont construit de très belles universités mais n'arrivent pas à attirer les chercheurs parce que la science requiert tout un écosystème et ne peut simplement s'acheter.

Un autre ingrédient important réside dans les contraintes, qui sont favorables à l'émergence d'un éclair de génie. La contrainte temporelle par exemple a joué un rôle primordial dans les découvertes d'Alan Turing pendant la Seconde Guerre mondiale. La recherche scientifique requiert par ailleurs un bon équilibre entre la persévérance et la chance, ainsi qu'un bon équilibre

entre la réflexion dure et l'inspiration. Un mathématicien passe 90 % de son temps à chercher une solution qui n'arrive pas. La recherche mathématique peut donc paraître comme une activité à faible rendement. En revanche, elle implique un important rendement sur le long terme quand elle se conjugue à un effectif élevé et quand les solutions apportées sont reprises et amplifiées par d'autres.

Le statut du scientifique dans la société

En France, les scientifiques sont à la fois très respectés et sacralisés. Le public les admire tout en se sentant très éloigné d'eux. Il convient donc d'insister sur l'idée selon laquelle le métier de scientifique est accessible à tous et fait partie des rares activités qui procurent encore une faculté d'émerveillement. La communication sur cette question de l'émerveillement est donc essentielle. La communication scientifique passe aussi par des références culturelles, technologiques, artistiques et familiales.

Le système éducatif français fonctionne mal pour de multiples raisons. Il n'existe pas de système parfait et les étudiants des pays les mieux classés sont angoissés et affectés par la surcharge de travail. Il est donc très difficile de définir un système équilibré.

Par ailleurs, l'emploi universitaire traverse une grave crise pour des questions démographiques, budgétaires et législatives, s'agissant en particulier des effets secondaires de la loi Sauvadet. En revanche, les entreprises sont fortement demandeuses en mathématiciens. Par ailleurs, il semble que les actions mises en place par le Gouvernement actuel concernant l'éducation aux mathématiques et l'emploi des docteurs vont dans le bon sens.

L'Institut Henri Poincaré et la communauté des mathématiciens organisent des expositions et des communications pour promouvoir les mathématiques. En 2015, nous organisons un colloque sur l'enseignement des mathématiques pendant la Semaine des mathématiques, en partenariat avec des représentants de la recherche pédagogique en mathématiques française, reconnue à juste titre comme la meilleure du monde alors que notre système d'enseignement rencontre d'importantes difficultés. La question qui se pose à nous consiste donc à trouver les moyens d'exploiter les ressources dont nous disposons.

En 2018, nous ouvrirons le musée Poincaré-Perrin, que nous avons conçu comme un croisement entre le Palais de la Découverte et la Cité des Sciences sur le créneau des mathématiques dans toutes leurs applications, au croisement entre la recherche, la pédagogie et l'industrie. Ce musée sera hébergé au sein de l'Institut Poincaré, au contact des chercheurs, et développé en partenariat avec des entreprises pour lesquelles les mathématiques jouent un rôle important dont Dassault Systèmes, Météo France, IBM France, Orange et pour qui il est important de pouvoir continuer à recruter des mathématiciens de haut niveau.

La France déposera sa candidature en vue du Congrès international des mathématiciens de 2022. Cet événement serait l'occasion de rendre justice au rôle de la France, nation la plus représentée au Congrès de 2014. Par ailleurs, j'ai accepté d'être le parrain du projet Exposition Universelle 2025 parce que les mathématiques et les scientifiques français ont un rôle important à jouer.

◆ Echanges avec la salle

Ghislaine HIERSO, présidente de l'Association Française des Petits Débrouillards

L'Association Française des Petits Débrouillards est une association d'éducation populaire par les sciences et pour les sciences. Il conviendrait de renforcer les partenariats pour promouvoir les sciences économiques et statistiques et les mathématiques.

Cédric VILLANI

La fondation La main à la pâte, les Petits Débrouillards, Universcience et la fondation Cap'maths font partie d'un ensemble d'acteurs qui doivent conserver leur identité tout en étant solidaires et en agissant en concertation parce que la promotion des sciences appelle d'importants efforts. Nous avons également besoin de l'aide des entreprises. Cette question est délicate car les actions en faveur de l'éducation et de la culture ne donnent leurs fruits que sur le très long terme. Néanmoins, ces actions sont indispensables.

Laurent GOUZÈNES

Le nombre de docteurs en mathématiques embauchés par les entreprises est passé de 100 avant 2010 à 400 selon les dernières statistiques.

Pierre DELORT, enseignant Big data... Mines Paris Tech

Pensez-vous que l'effort soit à produire sur les mathématiciens ou sur les décideurs pour que ceux-ci comprennent les mathématiques ?

Cédric VILLANI

Les deux sont nécessaires. Nous ne pouvons demander à un décideur de comprendre les mathématiques. La question du respect et de la confiance est essentielle. La plupart des problèmes concernant l'éducation se ramènent à une question de confiance ou de défiance entre les acteurs. Il convient donc de multiplier les rencontres.

L'une des raisons du succès de l'industrie allemande et de la réussite des transferts technologiques en Allemagne réside dans le respect, la confiance et la discipline qui régit la structuration des rapports. Les conseils d'administration des grandes entreprises allemandes par exemple sont beaucoup plus variés et comportent davantage de scientifiques que leurs homologues français. Le modèle français est basé sur une vision idéaliste mais très cloisonnante. Par conséquent, il fonctionnait bien à l'époque de la spécialisation mais n'est plus adapté au monde actuel.

Winston Churchill a joué un rôle fondamental dans l'histoire d'Alan Turing non parce qu'il connaissait les mathématiques mais parce que c'est lui qui a décidé d'allouer les moyens nécessaires à l'équipe des mathématiciens alors que le dossier était perdu dans les arcanes de l'administration.

Stéphane CORDIER

Il est estimé que seuls 10 % des mathématiciens du milieu académique sont en contact avec les entreprises. Ce taux augmente doucement et progressera plus rapidement si des rencontres sont organisées. Par conséquent, je vous invite à solliciter l'AMIES si vous souhaitez organiser des rencontres pour répondre à vos besoins en mathématiques.

Cédric VILLANI

Il est également nécessaire d'organiser des rencontres avec le monde de l'éducation. En règle générale, les professeurs de mathématiques n'ont aucune idée de la manière dont les mathématiques sont utilisées par les entreprises, de même qu'un professeur d'économie de lycée ne connaît généralement pas le monde de l'entreprise. Le contact et la discussion sont donc nécessaires. Cela permettrait par ailleurs à ceux qui critiquent l'éducation nationale sans la connaître de mieux appréhender ses difficultés.

Evelyne ROSAY, professeur d'économie à l'Université de Cergy-Pontoise

Ma question s'adresse à Gabriel Gross. Dans quelle mesure les météorologistes sont-ils associés à l'élaboration des algorithmes que vous utilisez pour permettre aux entreprises de se couvrir ? Etes-vous vous-mêmes couverts contre le risque d'erreur des prévisions météo ?

Gabriel GROSS

Notre activité consiste effectivement à organiser la collaboration entre des météorologues et des climatologues d'une part et des économètres et des actuaires d'autre part, dans l'objectif d'articuler l'intelligence développée sur le risque climatique avec la connaissance de son impact sur les entreprises pour calculer la valeur financière de son transfert.

Claude FOULON, expert dans l'industrie, l'énergie et l'environnement

Comment border les inventions des chercheurs sur le plan juridique ?

Cédric VILLANI

A partir d'un certain point, les protections nuisent à l'efficacité. Dans le domaine financier par exemple, les régulations de type Accords de Bâle sont souvent très critiquées, y compris par les spécialistes des mathématiques financières qui leur reprochent d'être trop compliquées et trop contraignantes. Il est donc possible que ces accords aient un effet néfaste, surtout connaissant la tendance de la France à faire les choses en grand dans le domaine légal et juridique.

S'agissant du brevetage des idées ou des algorithmes, un brevet doit impliquer une réalisation opérationnelle. Toute tentative de breveter des théories serait rejetée par les scientifiques eux-mêmes, qui s'y opposeraient pour des raisons morales. Par ailleurs, il serait très difficile de vérifier la paternité de ces théories. Enfin, une telle démarche trahirait le but des brevets puisque les brevets n'ont pas été inventés pour rendre justice mais pour favoriser l'émergence de projets nécessitant un investissement important.

Les dernières réformes du programme scolaire des mathématiques n'ont pas fonctionné. La baisse de niveau a été constatée par tous et les professeurs des grandes écoles s'inquiètent de la



survenue de problèmes de formation majeurs, y compris au niveau du raisonnement logique. Par ailleurs, le temps consacré à l'apprentissage des mathématiques a diminué et la question de la place de l'informatique n'a pas été bien résolue. L'enseignement de la physique a encore plus souffert et les professeurs de cette discipline se plaignent que leur programme ne permet plus d'établir des liens avec celui des mathématiques. L'enseignement de la physique a été réduit à des considérations qualitatives et à des démarches expérimentales. La familiarisation et la « dé-théorisation » ont été poussées trop loin. Ce constat est largement partagé et les enseignants de mathématiques demandent également une revalorisation des programmes de physique.

◆ Les mathématiques dans les politiques d'éducation, d'enseignement et de recherche, d'égalité des chances et diplomatique

Claudie HAIGNERÉ, présidente d'Universcience

Je travaille depuis cinq ans dans le champ de la culture scientifique et technique. Nous pouvons également parler de culture mathématique. Depuis quelques années, un fort courant œuvre aux Etats-Unis pour développer le STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics). En France, l'école n'accorde pas une place suffisante à l'ingénierie. Par ailleurs, il conviendrait d'adopter une nouvelle approche de l'enseignement des mathématiques dans le système éducatif classique mais également dans le système éducatif informel des centres de science et des associations. Aux Etats-Unis, le STEM est parfois élargi au STEAM pour inclure l'art et le design. Dans une entreprise, la science, les techniques, l'ingénierie et les mathématiques doivent s'accompagner d'un regard plus culturel, perceptif et moins immédiatement opérationnel. La composante artistique est également importante pour la performance des entreprises.

Par ailleurs, nous sommes tous conscients aujourd'hui de la nécessité de réconcilier les sciences dures et les sciences humaines qui se sont séparées après le Siècle des Lumières. Nous devons remettre en culture les sujets scientifiques et techniques pour que les sciences humaines, économiques et sociales et les sciences de la recherche fondamentale ou appliquée s'enrichissent mutuellement.

La politique éducative

Nous nous efforçons de promouvoir ces messages au niveau du Conseil Supérieur de l'Enseignement Scolaire et du Comité National des Programmes. Il convient par ailleurs de traiter le sujet de l'innumérisme, aussi important que l'illettrisme, pour que chacun de nos concitoyens maîtrise les outils fondamentaux. Des efforts doivent également être fournis pour améliorer l'image des mathématiques à l'école afin qu'elles ne soient plus perçues comme un outil de sélection. L'esprit des mathématiques doit faire partie du socle des connaissances et des compétences, aujourd'hui plus que jamais. Le langage des entreprises n'est pas suffisamment abordé à l'école. Nous devons donc agir pour que les mathématiques réintègrent une culture partagée.



Il est d'autant plus important de mettre en avant la démarche scientifique et la démarche d'ingénierie dans un contexte de flux d'informations permanents, difficilement contrôlables et dont il est parfois difficile d'extraire un sens. Nous devons montrer en quoi consiste une démarche qui vise à établir la validité d'une information et promouvoir les notions de rigueur, de précision, d'argumentation, de logique, de comparaison et de prédiction. La démarche scientifique et la démarche d'ingénierie, très structurantes pour la pensée, doivent être portées comme des éléments d'émancipation citoyenne et de responsabilité de chacun d'entre nous.

Les mathématiques constituent non seulement un outil ou un langage mais peuvent aider les individus à penser et à retrouver du sens. Le discernement est nécessaire pour gérer les données privées que nous communiquons sur internet ou qui seront utilisées par les objets connectés. Nous devons également mener une réflexion sur l'intégrité scientifique.

L'école est confrontée à ces sujets mais a la possibilité de s'appuyer sur les nombreux acteurs informels du système éducatif (associations et centres de sciences). Il est peut-être plus facile de faire passer le plaisir, la magie et l'émerveillement lié aux sciences dans les lieux informels. En effet, le déclic de la compréhension qui se produit au cours d'un jeu mathématique entraîne une jubilation qui constitue un facteur de confiance essentiel. Les mathématiques peuvent être utilisées pour cultiver la confiance en soi.

De même, il est plus facile de mettre en place des actions d'innovation pédagogique dans des structures informelles. Les médiateurs du Palais de la Découverte par exemple ont construit la planche de Galton pour reconstituer la courbe de Gauss et proposer une vision plus riche que l'approche livresque de ces éléments. Le Palais de la Découverte organise des récréations mathématiques au cours de laquelle les élèves peuvent manipuler la planche de Galton, pratiquer l'origami, visiter la salle des pavages qui illustre les cases des cristaux et la symétrie ou effectuer des ateliers de robotique. La magie et le cinéma peuvent également être utilisés pour s'émerveiller autour du sujet des mathématiques.

Par conséquent, la politique éducative ne se limite pas à l'école mais concerne les entreprises, les médias, les centres informels et la famille. Il est notamment important d'incarner les métiers pour que les enfants puissent en avoir une bonne représentation, tout en luttant contre les stéréotypes, sexistes notamment.

La politique de l'enseignement supérieur et de la recherche

Pour avoir exercé des responsabilités ministérielles, je sais qu'il existe une marge importante entre ce qui est souhaitable et ce qu'il est possible de réaliser. Par exemple, 80 % des professeurs des écoles sont issus d'une terminale littéraire, ce qui pose question quant à la promotion de l'image des sciences. Par conséquent, d'importants efforts doivent être menés pour transformer la formation des professeurs et pour renforcer l'attractivité des métiers du professorat. En 2013, le nombre de candidats au Capes de mathématiques était inférieur au nombre de postes ouverts. Il conviendrait par ailleurs de développer la perméabilité entre les filières de formation de l'enseignement supérieur, notamment au moment de l'entrée.

Un autre axe de progrès de la politique de l'enseignement supérieur et de la recherche consiste à développer l'interdisciplinarité, les mathématiques pouvant être considérées comme le bien commun des disciplines scientifiques. L'interdisciplinarité doit également intervenir entre les



sciences humaines et sociales et les sciences dures et passe par le recrutement des docteurs dans l'entreprise.

La politique d'égalité des chances

L'un des moyens de couvrir le déficit de docteurs en mathématique pour répondre aux besoins des entreprises consiste à accroître le nombre de femmes qui s'orientent vers ces carrières. J'ai donc souhaité que la dernière salle ouverte à la Cité des Sciences porte le nom de Marie-Sophie Germain parce que nous ne parlons pas suffisamment des femmes scientifiques et mathématiciennes en particulier.

Il est connu qu'à la sortie du lycée, les jeunes filles obtiennent généralement de meilleurs résultats que les jeunes garçons mais sont beaucoup moins nombreuses à s'orienter vers les filières scientifiques. Dans certains secteurs, les effectifs reculent nettement. La discipline universitaire la moins féminisée en France est celle des mathématiques pures, avec seulement 13 % de femmes. La part des femmes s'élève à 24 % dans la filière informatique et à 26,2 % dans celle des mathématiques appliquées. Au CNRS, les femmes ne représentent que 10 % des effectifs de la section de théorie physique et seulement 16 % de la section des mathématiques. En 2012, 6,5 % seulement des professeurs d'université en mathématiques fondamentales étaient des femmes, contre 14 % en mathématiques appliquées. Au rythme actuel, la parité sera atteinte en 2 324. Il est donc indispensable de prendre des mesures incitatives.

En revanche, de nombreuses femmes mathématiciennes se sont illustrées récemment telles que Sylvia Serfaty, Nalini Anantharaman, toutes deux lauréates du prix Henri Poincaré, Nicole El-Karoui et Laure Saint-Arymond, lauréate du prix Irène Joliot-Curie et benjamine de l'Académie des Sciences et Maryam Mirzakhani, qui vient de recevoir la médaille Fields à sa sortie de l'université d'Harvard dont le doyen ne s'est pas illustré par son optimisme quant aux capacités des femmes dans ce domaine.

Selon l'enquête Pisa, 61 % des jeunes de 15 ans de l'OCDE éprouvent de l'anxiété par rapport aux résultats de leurs épreuves de mathématiques. En France, ce taux s'élève à 66 % pour les garçons et à 78 % pour les filles. Par ailleurs, une étude montre que les professeurs de mathématiques, quel que soit leur sexe, consacrent 20 % de temps de plus aux garçons qu'aux filles. Enfin, l'expérience de Huguet et Régner sur la figure complexe de Rey montre que les garçons obtiennent des biens meilleurs résultats que les filles lorsque le sujet est présenté comme un problème de géométrie alors que la situation s'inverse nettement lorsque le même exercice est présenté comme un jeu mathématique.

Il convient donc de montrer les points forts et de s'appuyer sur les modèles de réussite au féminin. Cette situation concerne non seulement les jeunes filles à l'école mais également la place des femmes dans les entreprises et leur progression professionnelle jusqu'aux instances de décision, sachant que des études de grands cabinets conseil ont démontré la valeur ajoutée de la présence de femmes au sein des instances dirigeantes des entreprises.



La politique diplomatique

L'école mathématique française constitue un facteur d'attractivité de notre pays à l'international et contribue à son rayonnement. Néanmoins, ce sont souvent les aspects culturels classiques de la France qui sont mis en avant à l'étranger. Sa capacité éducative innovante et sa capacité scientifique et technique méritent d'être valorisées davantage. Il convient notamment de faire savoir que l'Institut de Recherche en Enseignement des Mathématiques français est le plus coté au niveau international. Ces éléments constituent autant d'atouts pour la candidature de la France à l'organisation de l'exposition universelle de 2025. Nous devons également favoriser les flux d'échanges avec les universités étrangères. Enfin, j'invite les entreprises à reconnaître la richesse et la jubilation des mathématiques.

◆ Echanges avec la salle

Olivier GUERARD

Je suis diplômé en économie et en mathématiques et je travaille à mon compte dans le secteur de l'assurance. En 2014, j'ai eu la surprise d'être contacté par l'Education Nationale pour enseigner les mathématiques dans un collège dont les professeurs étaient souvent absents. Au 5 janvier 2015, il manquait trente professeurs de mathématiques dans l'Académie de Versailles. J'ai accepté la proposition de l'Education Nationale, soit un temps plein de 18 heures par semaine pour un salaire de 2 000 euros nets par mois, ayant la possibilité de compléter mes revenus par ailleurs. Le collège où j'enseigne est classé en ZEP mais les enfants sont attachants et méritent notre intérêt.

Comment attirer dans les collèges et les lycées des étudiants de niveau bac+4 ou bac+5 ayant étudié les mathématiques avec un salaire net de 2 000 euros en début de carrière, trois fois moins élevé que celui qu'ils peuvent obtenir dans le privé ? Par ailleurs, quelle image des mathématiques l'Education Nationale donne-t-elle aux enfants si elle n'arrive pas à leur fournir des professeurs ? Les plus talentueux, polytechniciens et centraliens, préfèrent souvent essayer de faire fortune dans le trading de valeurs mobilières à l'étranger.

Claudie HAIGNERÉ

L'Education Nationale est consciente de ces problèmes. L'attractivité des métiers de l'enseignement constitue l'un des trois thèmes de la stratégie pour les mathématiques présentée en décembre 2014 par la ministre. Néanmoins, le changement demande du temps.

Laurent GOUZÈNES

45 % des professeurs de mathématiques du secondaire sont des femmes, contre 75 % pour les professeurs de lettres et 60 % pour les arts graphiques.



Claudie HAIGNERÉ

La part des femmes est très importante parmi les enseignants du primaire, principalement issus de la filière littéraire. Les actions visant à redonner de la joie et du plaisir dans l'enseignement des mathématiques s'adressent non seulement aux élèves mais également aux enseignants.

Gilles COHEN, directeur de la rédaction du magazine Tangente

La question de la culture est essentielle. L'enseignement des mathématiques sera facilité si elles dépassent le champ de la culture scientifique pour entrer dans celui de la culture citoyenne. Le problème est que nous sommes confrontés à un manque de vocation pour les sciences. Le développement de la culture des mathématiques nécessite un travail de la part de l'Education Nationale, des médias, des structures d'éducation informelles, des écoles d'ingénieur, dont la qualité est reconnue à l'étranger, et des filières universitaires et technologiques. L'ensemble de la société doit se mobiliser pour donner envie aux jeunes d'apprendre les sciences, y compris les chefs d'entreprise.

Il est très important que les entreprises tiennent compte des aspects scientifiques dans leurs modes de fonctionnement et en témoignent. Elles doivent également faire savoir qu'elles sont à la recherche de scientifiques issus de tous les niveaux, d'autant plus que les journalistes reprendront plus volontiers un message issu des entreprises que de l'Education Nationale. Il convient également de sensibiliser les parents pour qu'ils incitent leurs enfants à suivre des filières scientifiques.

Laurent GOUZÈNES

L'objectif de cette matinale est bien d'adresser un message des entreprises vers les journalistes, le grand public et les chercheurs. Nos entreprises ont besoin de mathématiciens pour être plus performantes dans tous les domaines. Nous souhaitons également sensibiliser les entreprises à l'intérêt d'utiliser les compétences des mathématiciens pour gagner en compétitivité. Nous nous inquiétons de la baisse des effectifs d'étudiants en mathématiques et les actions déployées par Universcience ne seront réellement efficaces que si nous parvenons à créer un environnement culturel global favorable. Il est ennuyeux par exemple que les élèves soient si stressés par un contrôle de mathématiques.

Ghislaine HIERSO, présidente de l'Association Française des Petits Débrouillards

La rareté des émissions télévisées sur les sciences est regrettable. L'Association Française des Petits Débrouillards a créé l'Alliance Sciences Société avec des partenaires de tous horizons pour promouvoir les interactions entre les sciences, la recherche et la société auprès des jeunes. Nous intervenons avec l'Inserm, l'Insee et différents laboratoires de recherche et nous préparons une opération « Les mille défis » pour favoriser l'approche des sciences au moment de la COP21.

Clôture

Gabrielle GAUTHEY

Présidente de la Commission « Recherche et innovation » du MEDEF

L'assistance plutôt nombreuse de ce matin montre que le MEDEF peut légitimement organiser un colloque sur les mathématiques. Le MEDEF a également pour fonction de rassembler des personnes de divers horizons pour porter des messages tels que celui qui ressort de cette matinale sur le rôle des mathématiques dans l'économie, l'emploi et la compétitivité des entreprises françaises.

Merci aux intervenants de ce matin pour leur force de démonstration concernant l'utilité des mathématiques et pour leur enthousiasme. Je remercie également Laurent Gouzènes, qui a conçu cette matinale, ainsi que les organisateurs du MEDEF et les participants, dirigeants d'entreprises, chercheurs, universitaires, enseignants de grandes écoles, représentants des différents secteurs utilisant les mathématiques.

Notre monde économique et technique n'a jamais eu autant besoin de mathématiques. La performance de secteurs aussi variés que l'informatique, les transports, l'agriculture, la biologie, la recherche pétrolière et l'ingénierie des systèmes complexes repose sur l'outil mathématique. L'étude du cabinet Deloitte montre clairement que 10 % des emplois sont directement liés aux mathématiques en Angleterre. Par ailleurs, 60 % des organisations du secteur privé pensent que l'utilisation de l'analyse de données et des mathématiques constitue un facteur important pour accroître la croissance des entreprises britanniques.

Le MEDEF et sa commission Recherche et innovation ont à cœur d'ouvrir aux entrepreneurs les portes de l'innovation. Nous organisons chaque année un Espace innovation, dont les deux dernières éditions portaient sur le numérique et sur la santé. Celui d'août prochain sera consacré aux changements climatiques. Notre objectif est de décloisonner et d'améliorer l'efficacité du système français de recherche et d'innovation au service de la compétitivité, de l'emploi et du succès de notre économie, en facilitant l'accès des entreprises aux réseaux de compétences.

Nous avons ouvert fin décembre, en partenariat avec ABG et la Conférence des présidents d'université, une plateforme web, My DocPro, qui constitue un référentiel de compétences des docteurs, y compris en mathématiques. Nous souhaitons ainsi réduire la dichotomie entre le monde des chercheurs et des docteurs et les grandes écoles d'ingénieur. Jusqu'à il y a peu, les ingénieurs étaient découragés d'effectuer de la recherche. Nous souhaitons également faciliter l'embauche des chercheurs.

Dans le même esprit de partage des bonnes pratiques et de management de l'innovation, nous avons créé un baromètre de l'innovation ouverte pour mesurer les freins à lever. Un défi sociétal et économique important consiste à susciter des vocations pour les sciences et à réconcilier les jeunes avec les mathématiques. Dans son projet France 2020, le MEDEF a retenu plusieurs filières d'avenir et d'excellence où la France peut se donner l'objectif d'être leader à savoir la santé, la cyberéconomie, le tourisme et le smart city. Les mathématiques jouent un rôle clé dans ces filières.



La R&D des entreprises est l'un des secteurs les plus dynamiques de recrutement des cadres. Grâce au crédit d'impôt recherche, 28 000 emplois nouveaux ont été créés en France en quatre ans, soit une hausse de 22 % des effectifs de la R&D privée, qui dépasse désormais la R&D publique. Nous avons néanmoins besoin d'encourager la vocation des hommes et des femmes. La parité est encore loin malgré quelques percées notoires des mathématiciennes. Les parcours remarquables comme celui de Claudie Haigneré peuvent être emblématiques, inspirer des vocations et ouvrir aux jeunes filles de nouveaux espaces d'expression, de création et de développement économique. Il convient également d'agir sur la société pour que des jeunes aient de nouveau envie de dédier leur vie aux mathématiques et à l'enseignement.

Nous devons néanmoins prendre garde à ne pas confiner les mathématiques à l'excellence et à l'élitisme. Les associations qui interviennent pour démystifier l'apprentissage des mathématiques méritent donc d'être remerciées. Pour quelques dizaines d'éminents lauréats de prix internationaux, quelques centaines de distingués chercheurs et universitaires, quelques milliers de solides ingénieurs, des millions d'individus de tout niveau de responsabilité sont dégoûtés à jamais de ce remarquable outil. Nous devons donc rendre l'apprentissage des mathématiques plus attractif et plus ludique et faire comprendre qu'il n'est pas réservé à une petite élite.

Vos suggestions seront reprises dans les travaux de prospective du MEDEF, destinés à proposer des réformes structurelles dans le cadre de sa démarche « 2020 : faire gagner la France ».

Les prochaines matinales porteront sur les freins à l'innovation ouverte à savoir la propriété intellectuelle, la nécessité de mieux associer les fournisseurs et la recherche de modes de partenariat plus efficaces pour décloisonner le monde de la recherche académique et les entreprises.