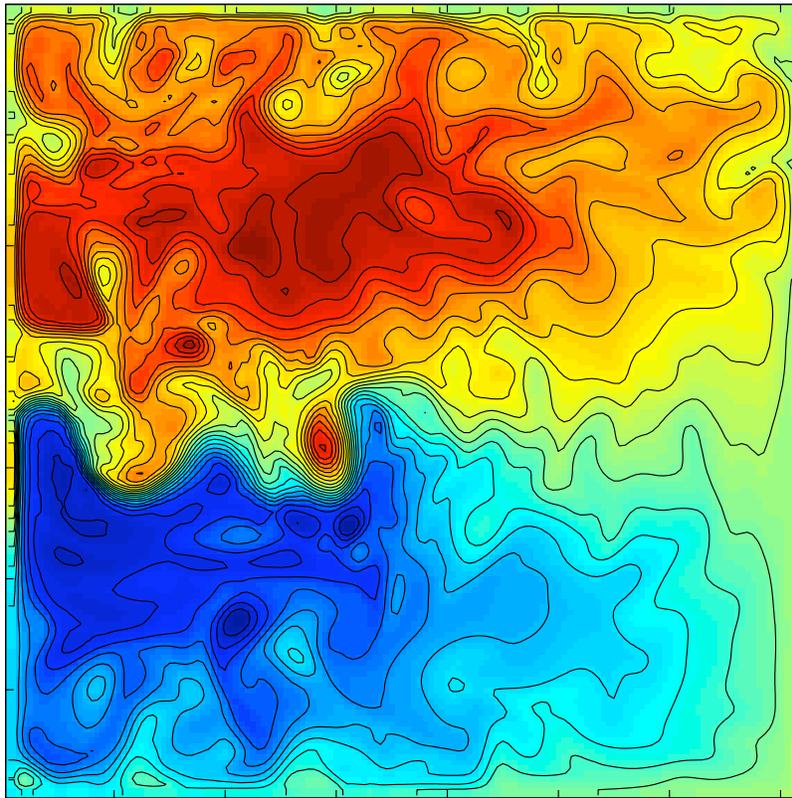




MATAPLI

SOCIÉTÉ DE MATHÉMATIQUES
APPLIQUÉES ET INDUSTRIELLES



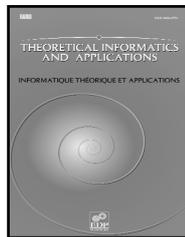
NUMERO SPECIAL 20 ANS • 2003



2004 Mathematics Online

www.edpsciences.org

- RAIRO - Theoretical Informatics and Applications (ITA)
- RAIRO - Operations Research (RO)
- ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis (M2AN)
- ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations (COCV)
- ESAIM: Probability and Statistics (P&S)
- ESAIM: Proceedings



0988-3754 • Vol. 38
4 issues

print & full-text online edition

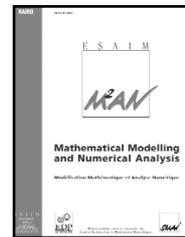
- * France: 301 €
- * Europe: 357 €
- * Rest of the world: 367 €



0399-0559 • Vol. 38
4 issues

print & full-text online edition

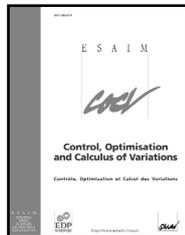
- * France: 261 €
- * Europe: 328 €
- * Rest of the world: 339 €



0764-583X • Vol. 38
6 issues

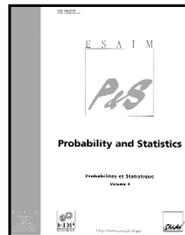
print & full-text online edition

- * France: 648 €
- * Europe: 811 €
- * Rest of the world: 830 €



1292-8119 • Vol. 10

- * Institutions (paper version only): Europe: 165 €
Rest of the world: 165 €
- * Institutions (online only): Europe: 218 €
Rest of the world: 218 €
- * Institutions (paper + online versions): Europe: 328 €
Rest of the world: 328 €
- * Individuals (online only): Europe: 52 €
Rest of the world: 52 €



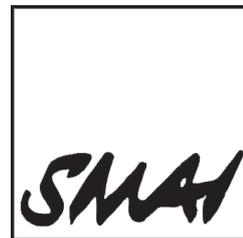
1292-8100 • Vol. 8

- * Institutions (paper version only): Europe: 82 €
Rest of the world: 82 €
- * Institutions (online only): Europe: 152 €
Rest of the world: 152 €
- * Institutions (paper + online versions): Europe: 211 €
Rest of the world: 211 €
- * Individuals (online only): Europe: 43 €
Rest of the world: 43 €



1270-900X

- * Electronic access to ESAIM: Proceedings' volumes is free of charges.



France and Europe: VAT included - Rest of the World: without VAT

ORDER DIRECTLY TO

EDP Sciences

17 av. du Hoggar • B.P. 112 • 91944 Les Ulis Cedex A • France
Tel. 33 (0)1 69 18 75 75 • Fax 33 (0)1 69 86 06 78 • subscribers@edpsciences.org

Sommaire

Éditorial	3
La SMAI de 1983 à 2003 : 20 ans	5
Conférence des 14-15-16 mai 2003 : Prospective sur la modélisation mathématique en biologie et en médecine	15
Tables rondes du 18 septembre 2003	21
Table ronde : Les métiers des Mathématiques	23
Table ronde : Le rôle des mathématiques dans l'industrie et les services	53
Conférence du 9 octobre 2003 : Réflexion sur les logiciels	83
SALOMÉ, par T. Nkaoua, OPEN CASCADE	87
Code Aster, par F. Waekel, EDF	89
Scilab, par C. Gomez, INRIA	98
La bioinformatique, par F. Rechenmann, INRIA	102
Les projets PRISM et ESMF, par J. C. André, CERFACS	108
Simulation numérique des matériaux, par G. Zerah, CEA	115
Prix 2003 de l'Académie des Sciences en informatique et mathématiques appliquées	117
J. Stern	125
R. Temam	129
J. F. Cardoso	135
L. Saint Raymond	141
V. Perrier	147
<i>Message de C. Haignéré</i>	154
Liste des correspondants régionaux	155
Bulletins d'adhésion	158

Image de couverture _____

"Variation de densité à la surface d'une solution turbulente des équations primitives pour la circulation double-gyre moyenne-latitude poussée par les vents (T. Tachim-Medjo, E. Simonnet)."

MATAPLI - Numéro spécial 20 ans • 2003

Édité par la Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles (SMAI)
Institut Henri Poincaré, 11 rue Pierre et Marie Curie, 75231 Paris.

[http ://www.smai.emath.fr](http://www.smai.emath.fr)

Directeur de la publication	Michel Théra, président de la SMAI
Réalisation	Colette Picard
Édition	Vuibert, 20 rue Barbier-du-Mets, 75647 Paris Cedex 13 www.vuibert.fr
Impression	CAMPIN - 13, rue Barthélémy Frison, B 7500 Tournai campin@wanadoo.be

Éditorial

par Michel Théra

D'importantes découvertes mathématiques ont été motivées par des problèmes pratiques. Ainsi, Gauss crée la géométrie différentielle pour résoudre des problèmes de géodésie, et découvre la loi statistique qui porte son nom en cherchant à éliminer les erreurs de mesures astronomiques. Poincaré découvre le chaos déterministe en étudiant les problèmes de la mécanique céleste. Mais c'est au vingtième siècle que les mathématiques appliquées prennent véritablement leur essor en s'appuyant sur le développement industriel et sur l'utilisation généralisée de l'ordinateur.

Pendant longtemps les mathématiques appliquées ont été tournées vers l'étude de processus industriels et on leur doit la constitution de disciplines comme les statistiques, l'analyse numérique, la recherche opérationnelle, l'optimisation et le contrôle. Plus récemment, le développement du secteur tertiaire a orienté les mathématiques vers de nouvelles directions, comme les mathématiques économiques et financières, ou les mathématiques de l'information, de la cryptographie et du codage.

La SMAI a été fondée en 1983, dans le dessein de maintenir un contact entre les diverses branches des mathématiques appliquées, de faire en sorte qu'elles s'enrichissent mutuellement.

Sous ma présidence, j'ai eu l'honneur et le plaisir d'organiser en 2003 le vingtième anniversaire de la SMAI et la célébration de cette année importante pour notre association. Que de chemin parcouru en deux décennies avec l'aide et le soutien de tous nos collègues. À différents niveaux, ils ont contribué à ce que la SMAI devienne une société respectée et reconnue, aussi bien au plan national qu'international.

Je tiens à remercier chaleureusement tous ceux qui, depuis le début, soutiennent l'idée que les mathématiques, qu'elles soient fondamentales ou appliquées, ont à tenir une place importante dans le développement de la recherche scientifique et, par là même, du progrès scientifique. Ils appuient aussi l'idée qu'intégrer les mathématiques au cœur de la société est une excellente manière de développer cette science. En effet, l'exemple actuel de la biologie montre que les applications sont une source de développements pour les mathématiques elles-mêmes.

Mes prédécesseurs à la présidence de la SMAI (Roger Temam, Jean-Claude Nédélec, Adrien Jami, Jean-Pierre Puel, Alain Damlamian, Patrick Le Tallec) ainsi que tous les nombreux collaborateurs (je ne peux pas citer, ici, tous les noms) doivent être remerciés pour leur travail et donc être associés pleinement cet anniversaire.

Pour l'instant, qu'il me soit permis de remercier les membres du bureau pour leur soutien et ceux qui ont bien voulu organiser les différentes manifestations : Frédéric Bonnans, Claude Le Bris, Yvon Maday, Gilles Pagès, Christian Saguez.

Par ailleurs, je tiens à remercier trois autres personnes qui ont joué un rôle important dans l'organisation de cette année anniversaire : Brigitte Lucquin, chargée de la communication ainsi que du dossier de presse, Gérard Tronel qui a retranscrit les débats du 18 septembre, et enfin, Colette Picard, chargée de mettre en œuvre ce numéro spécial de MATAPLI. Numéro qui restera une référence pour la SMAI.

La SMAI, à travers tous ceux qui l'ont représentée depuis 20 ans, s'est imposée comme une société active.

Au cours de mon mandat qui s'achève (déjà !), j'ai tout particulièrement tenu à poursuivre et à accélérer l'œuvre entreprise, mais aussi à amplifier la concertation et la collaboration avec les autres sociétés représentatives. Ceci tout en conservant comme il se doit la spécificité de la SMAI qui est le dialogue avec le monde de l'industrie et des services.

À l'heure où en France, un grand débat s'engage sur l'avenir de la recherche, le renforcement de la présence de la SMAI, sera d'une part, un élément essentiel pour faire valoir la vision des mathématiques que nous représentons et d'autre part elle contribuera à diffuser nos propositions.

Bon anniversaire et longue vie à la SMAI !



La SMAI de 1983 à 2003 : 20 ans par Michel Théra

La SMAI a été fondée en 1983, dans le dessein de maintenir un contact entre les diverses branches des mathématiques appliquées, de faire en sorte qu'elles s'enrichissent mutuellement, et d'agir pour que les mathématiques appliquées aient la place qui leur revient dans l'enseignement supérieur et la recherche. En effet, dans les années 80, il n'existait qu'une société savante représentative de l'ensemble des mathématiques : la SMF (Société Mathématique de France). Les mathématiciens intéressés par les applications étaient sous-représentés et n'y jouaient qu'un rôle mineur.

Du CSCU au nouveau projet

L'ancien Conseil National des Universités (CNU), instance qui gère les carrières et le niveau scientifique des enseignants-chercheurs et appelé à cette époque le Conseil Supérieur des Corps Universitaires (CSCU) est dissous. Lors de la préparation du nouveau projet, des indiscretions laissent filtrer que ce dernier ne comportera qu'une seule section, avec trois sous-sections : algèbre, géométrie, analyse. Estimant leur branche insuffisamment représentée, un groupe de mathématiciens appliqués demande à B. Descomps de prendre en compte leur revendication. J. C. Guillot (Paris 13), P. A. Raviart (Paris 6), R. Temam (Paris 11), J. C. Nédélec (Ecole Polytechnique) et P. Lascaux (CEA) obtiennent satisfaction avec la création d'une quatrième sous-section qui pourrait siéger indépendamment des autres sous-sections.

D'une crise à un constat

Quel que soit le domaine où elles interviennent, l'intérêt des crises est qu'elles suscitent des remises en question. À la même époque aux USA, deux sociétés savantes : l'American Mathematical Society (AMS) et la Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM (créée en 1952)) étaient reconnues auprès des autorités de tutelle comme des interlocuteurs légitimes. Si une structure équivalant au SIAM ayant une légitimité pour s'exprimer au nom de la communauté des mathématiciens appliqués avait existé en France, le ministère l'aurait consultée sur son nouveau projet.

L'urgence de s'organiser

Par ailleurs, au milieu des années 80, il apparaissait urgent que la communauté des mathématiciens appliqués affirme sa spécificité. En effet, d'une part, les besoins industriels et les interactions université-industrie s'amplifiaient, et d'autre part, la création de débouchés professionnels non académiques pour les étudiants de mathématiques devenait une préoccupation majeure. Tout cela appelait à la création et au développement de cursus de mathématiques appliquées.

La SMAI voit enfin le jour

Dans la foulée de cette prise de conscience, P Lascaux a piloté le projet de statut d'une société savante (loi de 1901). Dès le 9 mai 1983, une assemblée constitutive nomme un bureau provisoire présidé par R. Temam avec pour vice-Présidents : J. P. Boujot, D. Dacunha-Castelle, P. J. Laurent.

Les statuts, déposés le 31 mai 1983, par Roger Temam, parachevaient l'acte de naissance de la SMAI. L'assemblée générale du 3 mars 1984 entérina la nomination de R. Temam au poste de président de la société.

Entre ces deux dates, la première année d'existence de la SMAI fut consacrée à son organisation administrative, aux prises de contact avec les partenaires universitaires et industriels, à la mise en route des premières activités. La demande de création d'une maîtrise de mathématiques industrielles venant s'ajouter à la MAF figure comme la première proposition de la nouvelle société savante.

20 ans d'activités

Naissance des groupes thématiques

Le GAMNI (Groupe pour l'Avancement des Méthodes Numériques de l'Ingénieur), association créée au cours de l'année 1974, a choisi de rejoindre la SMAI à sa création en 1983, tout en continuant ses propres activités et le groupe permanent fut officiellement créé en 1985. Différentes thématiques relevant des mathématiques appliquées l'ont ensuite rejointe. Cette seconde étape, très importante pour l'avenir de notre société, a vu la constitution en 1991 des groupes MODE (Mathématiques de l'Optimisation et de la Décision) et MAS (Modélisation Aléatoire et Statistique). Plus récemment, en mars 2000, la SMAI s'est renforcée avec l'intégration de l'Association Française d'Approximation (AFA).

Rayonnement national et international

La recherche, tant théorique qu'appliquée, possède une dimension internationale. C'est pourquoi la SMAI est membre institutionnel de la *Société Mathématique Européenne* (EMS – European Mathematical Society) et d'ECCOMAS (*European Community on Computational Methods in Applied Sciences*). En même temps, elle a développé ses échanges avec les sociétés qui, de par le monde, s'attachent au développement des Mathématiques Appliquées : la *Society for Industrial and Applied Mathematics* (SIAM) aux Etats Unis, l'*Institute for Mathematics and its Applications* (IMA) au Royaume-Uni, la *Deutsche Mathematiker-Vereinigung* (DMV) et la *Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik* (GAMM) en Allemagne, la *Società Italiana di Matematica Applicata e Industriale* (SIMAI) en Italie ou la *Sociedad Española de Matemática Aplicada* (SEMA) en Espagne. Cette collaboration se traduit par des accords de réciprocité et par l'organisation de conférences communes. Elle est concrétisée par la participation active de la SMAI comme membre de l'*International Council on Industrial and Applied Mathematics* (ICIAM). En collaboration avec la SIMAI et la SEMA, la SMAI a créé le Prix ICIAM Lagrange, décerné

tous les quatre ans à l'occasion du congrès ICIAM. Ce prix, d'un montant de 3000 US Dollars, a pour vocation de récompenser un mathématicien appliqué de très haut niveau pour l'ensemble de sa carrière ; il a été décerné pour la première fois lors de l'ICIAM d'Edimbourg (1999) à Jacques-Louis Lions.

L'organisation du premier congrès ICIAM (International Council for Industrial and Applied Mathematics) de 1987 à Paris a été pour les fondateurs de la SMAI un formidable enjeu qui a assuré l'assise internationale de notre société.

En France, la SMAI coordonne ses efforts avec la *Société Mathématique de France* (SMF), la *Société Française de Statistique* (SFdS, ancienne ASU), *Femmes et Mathématiques* et dans le domaine de l'éducation avec l'UPS (*Union des Professeurs de Spéciales*) et l'APMEP (*Association des Professeurs de Mathématiques de l'Enseignement Public*).

Parmi les derniers exemples de collaboration, citons :

- La conférence "*Applied Mathematics and Applications of Mathematics*" (AMAM 2003) organisée à Nice, en collaboration avec l'European Mathematical Society (EMS) et la SMF.
- La publication de la brochure "*L'Explosion des mathématiques*" destinée au grand public, dont le but est de faire connaître, à travers un très grand nombre d'applications, le rôle des mathématiques dans la vie quotidienne.
- "*Toulouse 2004*" qui sera le premier colloque organisé par les sociétés françaises et canadiennes de mathématiques.
- La brochure "*Les métiers des mathématiques*", à laquelle nous collaborons, sous la direction de Gérard Tronel.
- Le séminaire "*Les mathématiciens et les industriels se parlent*" qui a été mis en place, en collaboration avec le CNRS, et avec le soutien de la SMF.

Publications

La SMAI développe une activité d'édition et d'organisation de rencontres, journées et congrès nationaux ou internationaux.

Elle publie trois fois par an un bulletin de liaison, Matapli, où, à côté d'articles scientifiques de synthèse, figurent des informations sur les congrès, les thèses, les livres parus, la vie de l'association et de la communauté plus généralement.

La collection *Mathématiques et Applications*, publiée sous la direction scientifique de la SMAI par les Editions Ellipses, puis par Springer-France, rassemble des monographies, correspondant en général à des cours de niveau DEA ou de dernière année d'école d'ingénieur. Le quarantième titre a été publié en 2003.

La collection "*Mastere*" est une réalisation récente, en partenariat avec les Éditions Belin. Elle consiste en une série de livres de niveau Mastere. Cette série met l'accent sur les aspects pédagogiques des ouvrages.

La SMAI assume la direction de plusieurs revues. Depuis 1995, elle a la responsabilité éditoriale et scientifique de la revue *Modélisation Mathématique et Analyse*

Numérique (M2AN), créée par l'AFCEC avec Gauthier-Villars. Tout en conservant sa version papier, cette revue est devenue accessible sous forme électronique en 1998. Depuis 1999, la société d'éditions EDP Sciences, nouveau propriétaire du titre, a la responsabilité de sa publication.

Dans le cadre d'une convention avec le Ministère de la Recherche signée en 1995, la SMAI a créé trois revues électroniques, avec le même type d'exigence scientifique que les meilleures revues sur papier (comité de rédaction, arbitrage scientifique). Ce sont ESAIM : Control, Optimisation and Calculus of Variations (ESAIM : COCV), ESAIM : Probability and Statistics (ESAIM : P&S) et ESAIM : Proceedings (ESAIM : Proc.). Depuis 1998, cette publication est conduite en collaboration avec la société EDP Sciences, qui prend aussi en charge la publication des volumes papier à la fin de chaque année civile.

Congrès, Écoles

Chaque année la SMAI organise le *Congrès d'Analyse Numérique* (le 35 ième en 2003). Les journées annuelles du groupe MODE et biennuelles du groupe MAS sont particulièrement appréciées par les jeunes chercheurs. Depuis 2001, un colloque qui représente toutes les thématiques scientifiques de la SMAI est organisé tous les quatre ans.

Une des actions importante de formation proposée par la SMAI est le CEMRACS (*Centre d'Été Mathématique de Recherche Avancée en Calcul Scientifique*). Il s'agit d'une école qui a pour vocation de réunir au CIRM (Centre International de Rencontres Mathématiques), durant l'été, des chercheurs en calcul scientifique et en mathématiques appliquées d'horizons divers (industriels et académiques, pour réaliser des avancées importantes dans le domaine des grands codes scientifiques traitant d'enjeux technologiques brûlants. En favorisant des interactions, le CEMRACS a également pour objectif de promouvoir des collaborations durables entre les différents partenaires.

Prix scientifiques

La SMAI et le GAMNI financent le Prix Blaise Pascal, d'une valeur de 1530 Euros, décerné chaque année par l'Académie des Sciences et destiné à récompenser un chercheur ayant accompli en France un travail remarquable dans le domaine des mathématiques appliquées et du calcul numérique dans les sciences de l'ingénieur.

Afin d'honorer la mémoire de Jacques-Louis Lions, la SMAI, avec le *Centre National d'Études Spatiales* (CNES) et l'*Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique* (INRIA), a fondé en 2003 le "Prix Jacques-Louis Lions" d'un montant de 10000 Euros. Ce prix, qui est un Grand prix thématique de l'Académie des Sciences, est biennal et récompense un scientifique pour un ensemble de travaux de très grande valeur en mathématiques appliquées, effectués en France ou en étroite relation avec un laboratoire français, dans les domaines dans lesquels Jacques-Louis Lions a travaillé : équations aux dérivées partielles, théorie

du contrôle, analyse numérique, calcul scientifique et leurs applications. Le premier *Prix Jacques-Louis Lions* a été décerné en 2003 à Roger Temam.

En 2003, la SMAI a participé, avec la SMF, au rétablissement du prix *Maurice Audin*.

Enfin, la SMAI a édité en 2003, avec le soutien du Ministère de la recherche, les *Oeuvres choisies de Jacques-Louis Lions*. Ces trois volumes rassemblent une sélection d'articles et de monographies représentatifs des travaux de recherche de Jacques-Louis Lions, regroupés par grands thèmes.

Voilà, résumées en quelques lignes, les activités de la SMAI au cours des vingt dernières années. Ce parcours n'est pas achevé. Les mathématiques appliquées jouant de plus en plus un rôle central dans la société, la SMAI devra prendre en compte de nouvelles thématiques et pénétrer davantage dans le monde non académique. Ce sera, j'en suis certain, l'occasion pour la SMAI de renforcer sa présence et son action, source de nouveaux succès.

Les bureaux de la SMAI de 1983 à 2003

Présidents :

Roger Temam	1983-1987
Jean Claude Nédélec	1987-1990
Adrien Jami	1990-1993
Jean Pierre Puel	1993-1996
Alain Damlamian	1996-1999
Patrick Le Tallec	1999-2001
Michel Théra	2001-2004

Secrétaires :

Patrick Lascaux	1983-1987
Gérard Meurant	1987-1991
Yvon Maday	1991-1995
Bernard Prum	1995-1998
Christine Graffigne	1998-2003
Alain Prignet	2003-

Trésoriers :

Jean-Pierre Puel	1983-1987
Marc Lenoir	1987-1990
Alain Forestier	1990-1993
Franois Murat	1993-1998
Patrick Le Tallec	1998-1999
Colette Picard	1999-2004

Vice-Présidents :

Jean Paul Boujot, Didier Dacunha-Castelle, Pierre-Jean Laurent, Nicole El Karoui, Alain Kavenoki, Patrick Tascot, Pierre-Arnaud Raviard, Alain Damlamian, Hervé Ledret, Michel Théra, Gilles Pagès, Claude Lebris, Brigitte Lucquin, Christian Saguez, Frédéric Bonnans

Rédacteurs en chef de MATAPLI :

Dorothee Normand Cyrot, Vivette Girault, Sylvie Gallic, Monique Dauge, Valérie Perrier, Brigitte Luquin, Alain Larguillier.

Il m'est enfin agréable de rappeler les contributions importantes d'Annick Maday et de Colette Guillopé.

Le CANUM

Depuis 1967 le Congrès National d'Analyse Numérique (Canum) permet chaque année aux universitaires, chercheurs et industriels concernés par l'analyse numérique de se rencontrer, de dialoguer, et d'échanger idées, problèmes et informations. Il vise à faire le point sur les développements récents dans le domaine de l'analyse numérique, plus généralement des mathématiques appliquées et présente un large spectre de sujets allant des aspects théoriques au calcul scientifique.

Le Congrès National d'Analyse Numérique est organisé chaque année par un laboratoire de mathématiques appliquées d'une université différente, conjointement avec la SMAI.

Année	Lieu	Univ. organisatrice	Organisateurs
1967	Paimpol	Rennes	Jean Cea
1968	-	Mai 68!!	-
1969	Aussois	Grenoble	P-J. Laurent, N. Gastinel
1970	VVF Super Besse	Clermont-Ferrand	P-L. Hennequin
1971	VVF Anglet	Toulouse	M. Atteia
1972	Epinal	Nancy	Legras
1973	VVFLa Colle s/ Loup	Nice	J. Cea
1974	VVF Gourette	Bordeaux	Y. Haugazeau
1975	VVFLa Grande Motte	Montpellier	B. Lemaire
1976	VVF Port Bail	Lille	C. Brezinski
1977	Imbours	Saint-Etienne	C. Carasso
1978	VVF Giens	Marseille	B. Martinet, R. Boyer
1979	Lamoura	Besanon	P. Lesaint
1980	Gouvieux	Compigne	J-P. Kernevez, J-P. Yvon
1981	Aussois	Ec. Centrale Lyon	C-M. Brauner, J-F. Maître
1982	VVF Belgodre	Toulon	P. Penel
1983	VVF Guidel	Orsay	R. Temam, C. Jouron
1984	VVF Bombannes	Pau	J. Genet, J-M. Thomas
1985	Puy St-Vincent	Polytechnique	J-C. Nedelec, A. Bamberger
1986	VVF Port Barcares	Toulouse	J-B. Hiriart-Urruty, M. Atteia, J. Gaches
1987	Paris	<i>Premier ICIAM</i>	
1988	VVF Evian	Paris 6	F. Murat, O. Pironneau
1989	Autrans	Grenoble	J. Blum, J. Della Dora, P. J. Laurent, P. Witomski
1990	Loctudy	Rennes et INSA-Rennes C. Lebaud, M. Crouzeix,	F. Brossier, C. Coatmelec, D. Martin, A. Mignot
1991	VVF Royan	Bordeaux	Le Roux
1992	Vittel	Nancy	M. Pierre, O. Kavian
1993	VVF Giens	Besançon	J-M. Crolet
1994	Les Karellis	Lyon I et INSA-Lyon	G. Bayada, M. Chambat
1995	VVF Super-Besse	Clermont-Ferrand	R. Touzani
1996	La Londe les Maures	Nice	D. Chenais, F. Poupaud

1997	Imbours	St Etienne	C. Carasso
1998	Arles	Marseille	R. Boyer, Y. Dermenjian, E. Pratt
1999	Ax-Bonascres	Toulouse	J-P. Vila
2000	VVF Port d'Albret	Paris 6	F. Murat, O. Pironneau
2001	Pompadour	UTC Compiègne	T. Ha Duong, G. Joly-Blanchard
2002	VVF Anglet	Pau	C. Amrouche
2003	VVF La Grande Motte	Montpellier II	B. Mohammadi
2004	VVF Obernai	Strasbourg	M. Gutnic, S. Salmon, E. Sonnendrücker

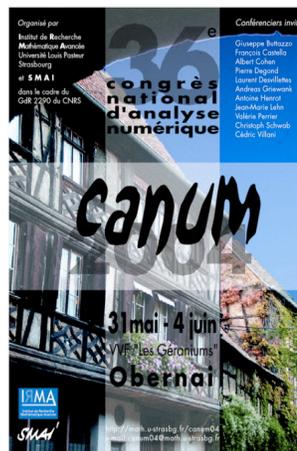
C'est un congrès très ouvert. Il est l'occasion pour chacun de diffuser ses travaux récents et, pour les jeunes chercheurs, de se faire connaître et de prendre contact avec les milieux universitaire et industriel.

Le Congrès comporte, d'une part des conférences plénières invitées et des mini-symposia, et d'autre part des communications orales ou sur panneaux.

La sélection et le choix de toutes ces interventions sont effectués par un Comité scientifique. Les communications orales ou sur panneaux (plus de 150 lors du Canum 2003) sont présentées en majorité par de jeunes chercheurs.

La demi-journée industrielle, organisée par la SMAI, aborde des thèmes différents chaque année. En 2003, pour le 35^{ème} Canum, elle a été consacrée à la modélisation et à la simulation numérique pour la prédiction et le contrôle de la pollution.

De 2001 à 2004, le Congrès National d'Analyse Numérique s'inscrit dans le cadre du GDR Canum 2290 du CNRS (Congrès Nationaux d'Analyse Numérique). Les autres soutiens financiers proviennent, généralement de la DGA, du Ministère de la recherche, du CEA et, selon les années, d'EDF, de France Telecom, de l'IFP, de l'INRIA, de Michelin, de PSA, ... , et d'instances locales. Des éditeurs scientifiques parmi EDP Sciences, Dunod, Elsevier, Oxford University Press, Springer Verlag, ..., et de logiciels (Comsol, Minitab, ...) présentent parfois leurs éditions mathématiques.



Mathématiques & Applications
Collection de la SMAI éditée par Springer-Verlag
Directeurs de la collection : M. Benaïm et J.-M. Thomas

- Vol. 12 P. Dehornoy, *Complexité et décidabilité*, 1993, 200 pp., 38,95 €-
- tarif SMAI : 31,16 €
- Vol. 13 O. Kavian, *Introduction à la théorie des points critiques et applications aux problèmes elliptiques*, 1993, 323 pp., 51,95 €- tarif SMAI : 41,56 €
- Vol. 14 A. Bossavit, *Electromagnétisme en vue de la modélisation*, 1993, 174 pp., 35,95 €- tarif SMAI : 28,76 €
- Vol. 15 R. Zeytounian, *Modélisation asymptotique en mécanique des fluides newtoniens*, 1994, 225 pp., 43,95 €- tarif SMAI : 35,16 €
- Vol. 16 D. Bouche, F. Molinet, *Méthodes asymptotiques en électromagnétisme*, 1994, 416 pp., 71,95 €- tarif SMAI : 57,56 €
- Vol. 17 G. Barles, *Solutions de viscosité des équations de Hamilton-Jacobi*, 1994, 194 pp., 30,95 €- tarif SMAI : 24,76 €
- Vol. 18 Q.S. Nguyen, *Stabilité des structures élastiques*, 1995, 148 pp., 29,95 €- tarif SMAI : 23,96 €
- Vol. 19 F. Robert, *Les systèmes dynamiques discrets*, 1995, 296 pp., 53,95 €- tarif SMAI : 43,16 €
- Vol. 21 D. Collombier, *Plans d'expérience factoriels*, 1995, 194 pp., 35,95 €- tarif SMAI : 28,76 €
- Vol. 22 G. Gagneux, M. Madaune-Tort, *Analyse math. de modèles non linéaires de l'ingénierie pétrolière*, 1995, 187 pp., 35,95 €- tarif SMAI : 31,96 €
- Vol. 23 M. Duflo, *Algorithmes stochastiques*, 1996, 319 pp., 59,95 €- tarif SMAI : 47,96 €
- Vol. 24 P. Destuynder et M. Salaun, *Mathematical analysis of thin plate models*, 236 pp., 42,15 €- tarif SMAI : 33,72 €
- Vol. 25 P. Rougée, *Mécanique des grandes transformations*, 1997, 412 pp., 74,95 €- tarif SMAI : 59,96 €
- Vol. 26 L. Hörmander, *Lectures on nonlinear hyperbolic differential equations*, 1997, 289 pp., 31,60 €- tarif SMAI : 25,28 €
- Vol. 28 C. Cocozza-Thivent, *Processus stochastiques et fiabilité des systèmes*, 1997, 436 pp., 79,95 €- tarif SMAI : 63,96 €
- Vol. 29 B. Lapeyre, E. Pardoux, R. Sentis, *Méthodes de Monte-Carlo pour les équations de transport et de diffusion*, 1997, 178 pp., 32,95 €- tarif SMAI : 26,36 €
- Vol. 30 P. Sagaut, *Introduction à la simulation des grandes échelles pour les écoulements des fluides incompressibles*, 1998, 282 pp., 53,95 €- tarif SMAI : 43,16 €
- Vol. 31 E. Rio, *Théorie asymptotique des processus aléatoires faiblement dépendants*, 2000, 170 pp., 34,95 €- tarif SMAI : 27,96 €
- Vol. 32 P. Cazes, J. Moreau, P.A. Doudin, *L'analyse des correspondances et les techniques connexes*, 2000, 265 pp., 47,95 €- tarif SMAI : 38,36 €
- Vol. 33 B. Chalmoud, *Éléments de modélisation pour l'analyse d'images*, 2000, 331 pp., 63,95 €- tarif SMAI : 51,16 €
- Vol. 34 J. Istas, *Introduction aux modélisations mathématiques pour les sciences du vivant*, 2000, 160 pp., 29,95 €- tarif SMAI : 23,96 €

- Vol. 35 P. Robert, *Réseaux et files d'attente : méthodes probabilistes*, 2000, 386 pp., 63,95 €- tarif SMAI : 51,16 €
- Vol. 36 A. Ern, J.- L. Guermond, *Éléments finis : théorie, applications, mise en œuvre*, 2002, 430 pp., 74,95 €- tarif SMAI : 59,96 €
- Vol. 37 S. Sorin, *A first course on zero-sum repeated games*, 2002, 204 pp., 37,93 €- tarif SMAI : 30,34 €
- Vol. 38 J.F. Maurras, *Programmation Linéaire, Complexité, Séparation et Optimisation*, 2002, 221 pp., 42,95 €- tarif SMAI : 34,36 €
- Vol. 39 B. Ycart, *Modèles et Algorithmes Markoviens*, 2002, 272 pp., 47,95 €- tarif SMAI : 38,36 €
- Vol. 40 B. Bonnard, M. Chyba, *Singular Trajectories and their Role in Control Theory*, 2003, 357 pp., 68,52 €- tarif SMAI : 54,82 €
- Vol. 41 A.B. Tsybakov, *Introduction à l'estimation non- paramétrique*, 2003, 175 pp., 34,95 €- tarif SMAI : 27,95 €
- Vol. 42 J. Abdeljaoued, H. Lombardi, *Méthodes matricielles - Introduction à la complexité algébrique*, 2004, 377 pp., 68,95 €- tarif SMAI : 55,16 €
- Vol. 43 U. Boscain, B. Piccoli, *Optimal Syntheses for Control Systems on 2-D Manifolds*, 2004, 261 pp., 52,70 €- tarif SMAI : 42,16 €
- Vol. 44 L. Younes, *Invariance, déformations et reconnaissance de formes*, 2004, 248 pp., 47,95 €- tarif SMAI : 38,36 €
- Vol. 45 C. Bernardi, Y. Maday, F. Rapetti, *Discrétisations variationnelles de problèmes aux limites elliptiques*, 2004, 310 pp., 57,95 €- tarif SMAI : 46,36 €, prix de souscription : 40,56 € (jusqu'au 30 septembre 2004).

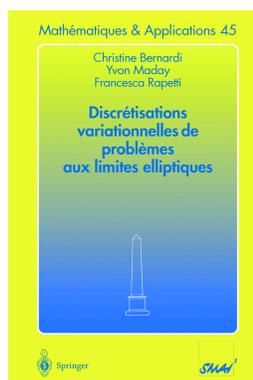
Le tarif SMAI (20% de réduction) et la souscription (30% sur le prix public) sont réservés aux membres de la SMAI.

Pour obtenir l'un de ces volumes, adressez votre commande à Springer-Verlag, Customer Service Books -Haberstr. 7 - D 69126 Heidelberg / Allemagne

Tél. 0 800 777 46 437 (No vert) - Fax 00 49 6221 345 229 - e-mail : orders@springer.de

Paiement à la commande par chèque à l'ordre de Springer-Verlag ou par carte de crédit (préciser le type de carte, le numéro et la date d'expiration).

Prix TTC en France (5,5% TVA incl.). Au prix des livres doit être ajoutée une participation forfaitaire aux frais de port : 5 €(+ 1,50 €par ouvrage supplémentaire).



Conférence :
**Prospective sur la modélisation mathématique
en biologie et en médecine**

Compte-rendu par Yvon Maday

grâce aux notes rédigées de Gabriel Caloz

La conférence *Prospective sur la modélisation mathématique en biologie et en médecine* s'est déroulée les 14-15-16 mai 2003 sur la campus de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière. Sollicitée par la CNRS, le directeur-adjoint de la section 01 du CNRS l'a rappelé lors de la table ronde de clôture, elle a été organisée par l'Institut Fédératif Mathématiques et Informatique de Chevaleret, avec le soutien du Ministère Délégué à la Recherche et aux Nouvelles Technologies. La conférence a également reçu le soutien de la SMAI, qui a inscrit cette conférence dans les manifestations organisées à l'occasion des 20 ans de la société savante.

Le programme a comporté 9 exposés scientifiques et une table ronde de clôture qui a abordé la question de communication entre les communautés de mathématiciens, de biologistes et de médecins. Elle a réuni environ 90 inscrits dont des doctorants financés par les subventions obtenues.

1. Les exposés

E. Grenier, ENS Lyon : *Quelques modèles d'accidents vasculaires cérébraux.*

Un accident vasculaire cérébral ischémique survient lorsqu'une artère se bouche, privant une partie du cerveau d'un flot sanguin suffisant. Emmanuel Grenier a tout d'abord exposé la physiologie de cette pathologie puis a proposé des modèles par des équations aux dérivées partielles de type réaction diffusion. Il a aussi présenté l'étude mathématique de divers phénomènes liés à la mort de certaines régions du cerveau : échanges ioniques, ondes de dépression corticales, apoptose et nécrose des tissus, oedème, suppléances, rôle du glutamate, inflammation ...

S. Méléard, Univ. de Nanterre : *Modèles probabilistes "individu-centrés" en dynamique adaptative.*

La dynamique adaptative est une branche de l'écologie proposant des modèles pour l'évolution des phénotypes, ou traits, prenant en compte l'effet des mutations et de la sélection, les mutations créant la diversité de traits sur laquelle la sélection peut opérer. Sylvie Méléard a présenté un modèle probabiliste qui donne une description microscopique de l'évolution des traits, en termes de naissance, mort intrinsèque, mutation et compétition. Cette description est donnée par un processus ponctuel markovien dont le générateur décrit toutes ces phases. Elle a montré en particulier que la non linéarité due au terme de compétition

entraîne une hiérarchie dans la complexité des équations de moments. Ceci permet d'étudier ensuite le comportement d'un tel processus renormalisé, quand le nombre initial d'individus tend vers l'infini. Pour une certaine renormalisation, le processus converge vers la solution d'une équation aux dérivées partielles non linéaire (déterministe), objet plus familier aux écologistes. Cette approximation macroscopique permet entre autres de donner des informations sur le comportement en temps long du processus.

J.P. Françoise, Univ. P. et M. Curie : *Approche multi-échelle et perturbations singulières dans l'analyse des oscillations des systèmes physiologiques.*

Il s'agit de faire le lien entre systèmes dynamiques et modélisation en physiologie. Le comportement du type bursting correspondant à des salves d'oscillations de haute fréquence séparées, de manière régulière, par des phases de quiescence, est l'un des modes d'oscillations les plus répandus en physiologie, et tout particulièrement en neurobiologie. Ces aspects de dynamiques lentes et rapides sont discutés sur le modèle de Fitz-Hugh-Nagumo. Le modèle de Hindmarsh-Rose tout comme la classification de Rinzel sont abordés. L'analyse qualitative de systèmes d'EDO donne des interprétations en biologie. L'analyse de ces rythmes naturels fait intervenir la théorie des perturbations singulières et la théorie des bifurcations des systèmes dynamiques. L'étude de leur synchronisation s'appuie sur des méthodes de moyennisation et d'approche multi-échelle.

A. Goldbete, Univ. Bruxelles : *Circadian rhythms : insights from mathematical models and computer simulations.*

Des rythmes neuronaux (0.001 s) aux rythmes en écologie et en épidémiologie (plusieurs années), on distingue quantité de rythmes. Pourquoi tant de rythmes ? Il s'agit de mécanisme d'oscillations et de régulations. Parmi tous ces rythmes, les circadiens (24h) sont très étudiés et sur une grande variété d'organismes. Un point important est de connaître le caractère endogène ou exogène de ces rythmes circadiens. À l'aide d'analyses qualitatives de modèles dynamiques de plus en plus complexes partant du modèle de Goodwin, on peut mettre en évidence le caractère exogène lié à une auto-régulation.

G. Bal, Columbia Univ. : *Quelques problèmes directs et inverses en tomographie optique.*

L'exposé aborde la modélisation mathématique de l'imagerie par photons qui sont utilisés en optique tomographique. On envoie des photons sur des tissus humains et on analyse les collisions (ou le signal qui en ressort sur les bords). Le traitement de couches non collisionnelles est étudié (problème direct), tout comme le problème inverse de reconstruire des objets de petites tailles mais de contraste arbitraire.

J.F. Gerbeau, INRIA : *Vers des simulations numériques d'écoulements sanguins.*

Des questions relatives à la simulation d'écoulements sanguins sont abordées. Pour les écoulements dans la grande circulation, on est en présence d'interaction fluide-structure ; pour les écoulements extra-corporels, on analyse la filtration de globules blancs. Pour le premier problème, les difficultés apparaissent au niveau du couplage *fort* de Navier-Stokes sur domaine mobile et de modèles de coques. Les conditions aux limites nécessitent un soin tout particulier. Une modélisation multiéchelle a été présentée. Pour le second problème, la simulation numérique devrait permettre une meilleure connaissance de l'écoulement et, idéalement, pourrait aider à mieux choisir certains paramètres de la filtration, déterminés jusqu'à présent de manière essentiellement empirique. Du point de vue de la modélisation, il s'agit de calculer un transport de particules en milieu poreux, les particules pouvant interagir avec le substrat.

B. Maury, Univ. P. et M. Curie : *Simulations directes d'écoulements biologiques*.

L'exposé aborde la simulation directe des fluides biologiques qui sont des fluides complexes où interagissent des particules en mouvement. Bertrand Maury a présenté la modélisation, les méthodes numériques et des résultats de simulation où des milliers de particules, prises en compte individuellement par un calcul de forces exercées sur chacune, évoluent dans un fluide actif. Quant aux phénomènes microscopiques abordés ils concernent l'agglomération, la chimiotaxie et la transmission par contact.

N. Bonnet, Hop. Pitié Salpêtrière : *La modélisation en médecine : exercice universitaire ou nouvel outil de soin*.

En médecine, font partie des modèles : le croquis, le mannequin, le cadavre, l'animal, le *patient*, l'ordinateur... Clairement pour l'avenir la modélisation numérique - aura un important intérêt pédagogique, par exemple pour les représentations animées...

- permettra d'imaginer des simulateurs en training chirurgical, en particulier pour améliorer les courbes chirurgicales...

- permettra d'aborder la téléchirurgie \subset la télémédecine \subset NTIC. L'intérêt de la numérisation est immédiat...

La modélisation deviendra-t-elle un outil pour le diagnostic et pour les traitements ? On parlera alors de réalité augmentée.

Il est important de bien noter que les connaissances en modélisation mathématique doivent être communiquées aux médecins, ça peut leur donner des idées !

J. Demongeot, IMAG Grenoble : *Modélisation de morphogénèse*.

Les processus importants de la morphogénèse commencent à être mieux connus aux différents stades du développement (embryogénèse, néogénèse et dysgénèse). Les modèles mathématiques évoluent parallèlement, partant de l'approche classique réaction/diffusion de morphogènes et allant vers des modèles plus complexes incorporant le contrôle génétique, les contraintes géométriques, l'influence

de champs externes,... L'exposé aborde en particulier la gastrulation par différenciation et prolifération.

2. La table ronde

Le débat est lancé par la question : *Est-ce le travail d'un mathématicien d'entrer en contact avec les médecins ?*

Comme il est montré dans les exposés, les collaborations sont diverses et variées. Il peut s'agir d'un investissement important du mathématicien pour comprendre les questions des biologistes, les assimiler et adapter les outils mathématiques pour étudier et interpréter les modèles mathématiques obtenus ou alors d'une réponse *mathématique* à une question précise posée par un biologiste connaissant la culture mathématique. Une collaboration mineure mathématique-biologie peut conduire au développement d'outils spécifiques suffisamment généralistes pour être réutilisés dans différentes situations. Généralement les collaborations démarrent à partir de contacts personnels.

Dans ce cadre, il est essentiel d'éviter que le biologiste ou le médecin soit un pourvoyeur de données et le mathématicien un pourvoyeur de compétences. Un médecin peut très bien instrumentaliser le mathématicien ; il est nécessaire d'avoir des échanges *gagnant-gagnant*. Il faut certainement de part et d'autre modérer et moduler les exigences. Une grande qualité du mathématicien est certainement sa capacité à conceptualiser, elle ne doit pas être sous-estimée. Toutefois le biologiste n'assurera rien quant à l'intérêt des mathématiques qui peuvent découler d'une collaboration pluridisciplinaire.

Il est vrai que l'étude de systèmes biologiques, systèmes dynamiques complexes, et la *computational biology* se développent beaucoup aux États-Unis et dans une moindre mesure en Europe. Après avoir acquis des bases de données génomiques, protéiques, il s'agit maintenant d'organiser les données, d'exploiter ces bases en introduisant des modélisations. Les mathématiciens sont associés à ce travail.

Mais attention la modélisation en biologie peut toucher à des questions brûlantes et intéressantes, comme la modélisation épidémiologique, qui peuvent toucher à des décisions de mesures de protection voire des choix politiques.

N'oublions pas de rappeler que les interfaces de la biologie sont nombreuses : biomathématique, biomécanique, biophysique, biochimie...chacune étant un front intéressant.

Faut-il des structures pour cadrer ces collaborations ? Non si l'on pense que pour avancer rapidement et améliorer la réactivité, il faut laisser le système s'adapter par lui-même. Oui si l'on pense qu'une structure du type INRIA ou CNRS permet à ses chercheurs de se lancer rapidement dans une recherche nouvelle et surtout de donner une visibilité aux actions de modélisation mathématique. Pourquoi pas un *bon* projet d'Unité de Services CNRS ? Il s'agit d'une structure que la direction du CNRS souhaite garder souple, réactive, évolutive et limitée dans le temps.

Le CNRS a une stratégie claire d'ouvrir une dizaine de grands centres de mathématiques en France. Les mathématiciens ont besoin d'infrastructures solides et visibles même s'ils ne sont pas demandeurs de gros budgets expérimentaux. Où, dans cette logique de centres de mathématiques, faut-il placer les biomathématiques? Dans un ou deux centres dédiés ou alors dans des projets fléchés? Il s'agit d'une vraie question stratégique. C'est attrayant d'imaginer des projets venant de la base. Si l'on songe à un institut il faut éviter de le faire durer 25 ans! Dans ce cas, pourquoi pas imaginer un institut hors mur?

Dans les pays étrangers plusieurs cas de figures existent : en Belgique, on trouve des mathématiciens (en petit nombre) dans des laboratoires de biologie, en Angleterre on retrouve de la biomathématique dans des laboratoires de mathématiques... Aux États-Unis, on retrouve des mathématiciens qui se sont orientés vers la biologie, tout comme on retrouve un centre de biomathématique dans l'Ohio, trop récemment formé pour avoir du recul de sa pertinence.

En France on retrouve quelques mathématiciens rattachés à des unités INSERM, même si aucun effort dans cette direction n'a été consenti depuis une dizaine d'années, une action pourrait déjà être de recenser ces collègues. D'autre part les collaborations entre les médecins et les mathématiciens existent mais sont parcellisées donc pas très visibles. Les questions de carrière et de reconnaissance scientifique peuvent être difficiles à faire valoir. Au CNRS, on retrouve des essais de collaborations avec la mise en place de commissions interdisciplinaires.

Peut-être est-il possible de faire interagir plusieurs tutelles différentes : INSERM, INRA, CNRS? Est-ce que la SMAI a un rôle à jouer? Certes elle peut servir de relais et d'aide mais la SMAI manque de bras.

L'existence d'un institut (hors mur) pourrait fédérer l'organisation de séminaires, de workshops voire de formations au niveau d'une école doctorale. Dans les mastères proposés jusqu'à maintenant on n'en compte pas en biomathématique. On pourrait peut-être profiter des changements de la LMD pour faire quelque chose. Oui mais pour quel débouché en milieu industriel? Même si le milieu biomédical sera demandeur d'emploi de façon général, il n'est pas évident d'y voir la place (en nombre) de biomathématiciens.

Relevons qu'on a noté l'absence dans cette conférence d'invités industriels et quelques projets précis de collaborations pour afficher la diversité des interactions. Cet aspect, important pour la réflexion au niveau Master et Doctorat sera corrigé lors d'un prochain congrès organisé par la SMAI.

Il est rappelé finalement que le CEMRACS'04 organisera son école d'été et ses projets au CIRM l'an prochain sur le thème des biomathématiques :
<http://smi.emath.fr/cemracs/cemracs04/>.



Centre d'Été de Mathématiques et de Recherche Avancées en
Calcul Scientifique

*Mathématiques et Applications
en Biologie et Médecine*

*du 26 juillet au 3 septembre 2004
au CIRM à Marseille*

Organisateurs :

Eric Cancès (ENPC), Jean-Frédéric Gerbeau (INRIA)

<http://smai.emath.fr/cemracs/cemracs04>

Summer school 26th - 30th July 2004

- **Cardiovascular system modelling and simulation**
 - Alfio Quarteroni (Politecnico di Milano and EPFL)
 - Annie Raoult (Université Joseph Fourier, Grenoble)
 - Denis Caillerie (INPG, Grenoble)
 - Jacques Sainte-Marie (INRIA, Rocquencourt)
- **Mathematical models in biology and ecology**
 - Régis Ferrière (ENS Nice)
 - Etienne Pardoux (Université de Provence, Marseille)
 - Pierre Sonigo (INSERM, Paris)
 - François Taddei (INSERM, Paris)
- **From medical imaging to numerical simulations**
 - Pascal Frey (Université Paris VI and INRIA Rocquencourt)

Research Center 26th July - 3rd September 2004

- **Topics include**
 - Medical imaging and myocardium modelling
 - Optimization of treatments of cardiac resynchronization
 - Blood flow simulation
 - Modelling of the human digestive system
 - Electro magneto encephalography
 - Simulation of the thermal effects induced by cellular phones
 - Molecular dynamics in drug design
 - Cellular ageing
 - Genetic therapy

Tables Rondes organisées à l'occasion du vingtième anniversaire de la SMAI

Dans le cadre des manifestations organisées à l'occasion du vingtième anniversaire de la SMAI, des tables rondes se sont tenues au ministère de la Recherche et des Technologies nouvelles, le 18 septembre 2003. Elles sont retranscrites ci-dessous.

Table ronde "Les métiers des mathématiques"

Cette première table ronde a pour but d'illustrer l'importance des débouchés professionnels de haut niveau, en dehors des métiers de l'enseignement et de la recherche académique, pour des étudiants ayant suivi un cursus mathématique avancé.

À cette fin, nous confrontons les parcours professionnels de personnes d'horizons très divers qui ont suivi un tel cursus, dans des domaines variés des mathématiques appliquées (calcul scientifique, finance, télécommunications, statistique, image, optimisation, etc.) ou qui dirigent des équipes composées de personnes ayant ce type de profils.

Certains intervenants travaillent dans de grosses structures industrielles et / ou de services, d'autres dans des PME, à des stades variés de carrière (juniors, cadres expérimentés) et dans des secteurs divers (finance, image, télécommunications, informatique, etc.). Nous avons également invité des personnes ayant développé, lors de leurs dernières années d'étude, une double compétence : mathématiques et électronique, mathématiques et informatique, ...

Parallèlement à ces témoignages issus de l'entreprise, la parole est donnée à des universitaires impliqués dans des formations ou des domaines mathématiques débouchant sur ce type de métiers. L'un des intervenants universitaires, ayant participé au Comité National d'Évaluation (CNE) sur les mathématiques appliquées et notamment sur la question des métiers des mathématiques, apporte un éclairage synthétique (et statistique) sur le sujet, tant en termes de débouchés effectifs que d'offres de formation.

Cette table ronde a été animée par Gilles Pagès. Les intervenants sont Monique Pontier (Université de Toulouse 3 et CNE), Aurélien Schmied (Renault), Nicolas Gausse (Société Générale), Frédéric Guichard (Vision IQ), Benoît Rottembourg (Bouygues), Olivier Pironneau (Labo. JLL, Université Paris 6), Gilles Pagès (Labo. PMA, Université Paris 6).

Table ronde "Les mathématiques dans l'industrie et les services"

Les mathématiques jouent un rôle tout à fait fondamental pour l'ensemble des secteurs industriels et économiques, tant pour la conception de nouveaux produits et services à l'aide des techniques de modélisation, de simulation et d'optimisation, que pour les techniques et outils de traitement de l'information (données, images, textes, connaissances).

S'appuyant sur une École de Mathématiques Appliquées Française au tout premier rang mondial, la maîtrise de ces compétences apporte aux industries un facteur différenciant fort en terme de compétitivité et de capacité d'innovation. Ainsi, par exemple, l'utilisation en aveugle de logiciels de CAO ou de simulation, intégrant des modèles et techniques non connus, induit une dépendance forte face aux concepteurs de ces outils.

Dans ce contexte, il est important de promouvoir ces éléments à tous les niveaux : politiques, industriels et grand public, afin de développer et au moins maintenir l'avance de la France.

- Face à la diminution du nombre de jeunes étudiants dans les domaines scientifiques, il est essentiel d'informer des formidables enjeux scientifiques et des potentialités importantes de carrières professionnelles dans ce domaine.
- Il est indispensable d'afficher une priorité forte pour les thématiques Mathématiques Appliquées dans les nouveaux programmes nationaux et européens afin notamment de pouvoir développer une industrie forte du logiciel scientifique.

L'objectif de cette table ronde est d'apporter les témoignages de décideurs importants de l'industrie et des services sur les grands enjeux scientifiques, technologiques, industriels et économiques du domaine des Mathématiques Appliquées, sur les forces et les faiblesses de notre pays et sur les grandes orientations à promouvoir.

Elle a été animée par Marie-Odile Montchicourt. Les intervenants sont : Bruno Stoufflet (Dassault-Aviation), Christian Mari (SNECMA), Patrick Lascaux (CEA), Claude Vangoren (Pechiney Aluminium), Claude Jablon (Total), Philippe Lacour-Gayet (Schlumberger), Jean-François Boulier (Crédit Lyonnais), Philippe Briday (Directeur de cabinet de Madame la ministre Claudie Haigneré).

Préambule de Gérard Tronel

Les tables rondes ont été enregistrées sur bandes magnétiques et je me suis efforcé de les transcrire le plus fidèlement possible ; mais transformer du langage parlé en texte écrit est toujours une gageure. J'ai essayé de conserver le caractère vivant des débats, mais j'ai dû éliminer les interjections, j'ai dû modifier le texte lorsque les répétitions devenaient trop récurrentes. J'espère toutefois ne pas avoir trop trahi la parole de tous les intervenants. Des commentaires peuvent toujours être ajoutés. Il aurait été possible de soumettre le texte écrit à tous les acteurs de ces tables rondes, j'y ai renoncé pour de nombreuses raisons : des délais très courts, des réactions des intervenants qui ont pu se trouver modifiées par l'évolution rapide des réformes qui se profilent, notamment le LMD et les changements de la situation économique, notamment la crise de la recherche. De toute manière les enregistrements sur les bandes magnétiques feraient foi en cas de litige !

Table ronde
Les métiers des mathématiques
animée par Gilles Pagès
Transcription de Gérard Tronel

Gilles PAGES. Nous allons entamer cette table ronde pour alimenter les débats par une intervention de Monique Pontier de l'Université Toulouse III : elle va nous parler des formations en mathématiques appliquées et de leurs débouchés.

Monique PONTIER. Nous avons travaillé pour le Comité National d'Évaluation - CNE - sur l'évaluation des formations supérieures en mathématiques appliquées ; ce travail, nous l'avons commencé en 2000 et nous avons rendu nos conclusions en juillet 2002. Je remercie notre collègue qui, je vois, a donné le rapport à certains d'entre vous. Mais il s'est déjà passé un certain temps depuis que la SMAI m'avait demandé de parler des métiers des mathématiques appliquées dans le cadre du LMD, c'était il y a huit mois et la situation politique et économique a évolué depuis et je me suis senti obligée de faire un mini sondage parce que toutes les observations et les conclusions de ce rapport ne sont plus forcément tout à fait exactes. De plus l'enthousiasme et l'optimisme que j'avais alors sont peut-être un peu moins de mise.

Donc, quand j'ai su que je devais parler aujourd'hui, j'ai fait un mini sondage auprès de quelques collègues, responsables de formations BAC+5, sondage qui n'est pas exhaustif : je me suis concentrée sur les DESS, mais j'ai eu quelques informations sur les DEA. J'ai pu contacter huit responsables de DESS : ceux de Toulouse I et de celui à cheval sur Toulouse I et Toulouse III, ceux du Mans, d'Orléans, d'Evry, de Marne-la-Vallée, de Nancy et d'Aix-Marseille I. L'ambiance est un petit peu morose, sauf peut-être à Toulouse et je vous dirai pourquoi.

Je leur ai posé deux questions :

- Les diplômés 2002 ont-ils facilement trouvé du travail ?
- Les diplômés 2003 ont-ils facilement trouvé des stages ?

Tout compte fait, sur ces huit DESS qui me semblent assez représentatifs, effectivement les jeunes diplômés de 2002 ont quelques fois mis douze mois pour trouver du travail, mais ils en ont tous trouvé. J'ai, par exemple, des collègues qui m'ont dit que d'habitude à la soutenance de stage, en l'occurrence en septembre 2001, plus de la moitié des étudiants avaient déjà un emploi, pas nécessairement dans l'entreprise où ils faisaient leur stage, mais en septembre 2002 ce n'était déjà plus le cas. Les promotions 2002 et 2003 ont eu du mal à trouver des stages.

J'ai eu des informations autres que les réponses aux deux questions. Les problèmes qui se posent à ces responsables et je ne pense pas qu'ils soient les seuls à se les poser, est le problème du recrutement évoqué par Michel Théra dans l'introduction à cette table ronde. Il y a un problème de recrutement des étudiants ayant une formation scientifique, problème que nous ne sentions pas lorsque que nous avons rédigé le rapport du CNE. Dans le rapport vous trouverez qu'à la

rentrée 1995 et de 1995 à 2000, en mathématiques appliquées, c'est-à-dire en MIM, maîtrise d'ingénierie mathématique, MASS, maîtrise appliquée aux sciences sociales, DESS, DEA - il s'agit des DEA à profil de mathématiques appliquées - sauf pour les DEA qui sont stables, nous avons eu une augmentation importante des effectifs en partie due à l'augmentation du nombre des filières. Nous ne sentions pas encore la baisse des effectifs lors de la présentation du rapport du CNE : elle était sensible pour les maîtrises de mathématiques pures, mais pas pour les maîtrises de mathématiques appliquées et pour la MIM.

Les responsables sont confrontés à ce problème d'effectifs et la réponse dépend des responsables. Il y a, en gros, deux réponses possibles : ne pas remplir toutes les places disponibles, mais alors on peut se faire réprimander par les présidents d'université parce qu'il faut remplir les places, ou bien descendre plus bas dans les listes d'admission et dans ce cas on risque des déconvenues : les étudiants, un peu limite, qui ont été acceptés, ou bien ne trouvent pas de stage, ou bien s'ils ont été acceptés en stage sont si peu pertinents que le responsable du stage dans l'entreprise, même s'il est lui-même un ancien du DESS, ce qui arrive fréquemment, dit : "Si c'est ça, moi je ne prends plus de stagiaires". Ce qui entraîne un gros problème pour nous dans la mise en place des stages pour les futurs étudiants.

La situation à Toulouse est un peu moins mauvaise, je cite le DESS de Toulouse I et III : 36 diplômés en 2002, il n'en reste que quatre en recherche d'emploi, ce qui n'est pas énorme. Un n'a pas précisé son emploi, 23 sont chargés d'études en statistiques ou consultants, quatre font de l'actuariat, un est en bio-statistiques, trois ont repris des études, j'aime bien dire "ont repris des études" : ce sont bien souvent des étudiants qui se rendent compte que ce n'est pas exactement cela qu'ils ont envie de faire. Pour nous, à la SMAI, c'est tout bénéfique. Voilà des étudiants qui ont une formation en mathématiques appliquées, qui ont travaillé en entreprise et qui éventuellement seront professeurs et c'est très bien car on aura des enseignants qui sauront ce que sont les mathématiques appliquées et industrielles, il n'y en pas tant que cela. Pour préciser, dans le cas de Toulouse, le genre d'emploi obtenu par les diplômés de Toulouse I et III, j'ai noté Soft Computing, Crédit foncier, service de biométrie de Pierre Fabre, Banque populaire, MACIF, SANOFI, AXA, COFINOGA. Cette diversité d'entreprises reflète tout à fait ce que nous avons noté dans le rapport ; les secteurs d'embauche que celles d'entre nous, chargées de l'analyse et de l'étude complémentaire, pages 74 et suivantes du rapport, ont mis en évidence c'est la diversité de ces secteurs où nous avons d'anciens étudiants du DESS de mathématiques appliquées ou du DEA à profil de mathématiques appliquées : la banque, l'assurance - dans ce dernier cas je pense au Mans - sondages, médical et biomédical, pharmacie - je vous ai cité plusieurs laboratoires pharmaceutiques dans les débouchés des étudiants de Toulouse - organismes de recherches, conseils en ingénierie - les SSII sont en baisse m'ont dit certains collègues alors que c'était là où d'habitude, par exemple pour GEMINI, beaucoup d'étudiants étaient placés : CGEY n'en prend pratiquement plus. L'informatique est un débouché en baisse. On peut ajouter à la liste : marketing, sociétés de services, ventes par correspondance- je pense au DESS du nord de la

France -, audio-visuel, traitement de l'image, météorologie- à Toulouse - environnement, pollution- en Bretagne notamment, il y a une demande pour les études sur la pollution et cela fait appel à des modèles mathématiques-, aérospatiale, chimie. Tous ces secteurs ont été inventoriés comme étant des débouchés possibles pour les mathématiques ce qui montre une très grande diversité.

Ce que nous avons noté aussi, et c'est important quand on parle des métiers des mathématiques, ce sont les compétences attendues et les métiers offerts, ce sont des termes un peu génériques, tout ceci figure dans la partie complémentaire - étude des débouchés - du rapport du CNE. Dans les compétences attendues, métiers offerts, j'ai relevé : bonne connaissance des outils informatiques - c'est une constante, les formations de mathématiques appliquées comportent une bonne part de compréhension et d'utilisation des outils informatiques -, conception et exploitation de banques de données, aide à la décision, tout ce qui concerne l'optimisation est abordé dans les cursus de mathématiques appliquées, calculs de risques, contrôle de qualité, traitement de l'information, simulation - il coûte moins cher de simuler les torsions de pales d'hélicoptère que de les tordre dans une soufflerie -, calcul scientifique, codes de calculs, mécanique des fluides numérique, élaboration de modèles - la modélisation est une part très importante, mais nous avons mis, comme réserve, que dans les cursus la modélisation n'était pas suffisamment abordée dans la formation alors que c'est une grosse demande et que c'est crucial dans les métiers qui utilisent les mathématiques. Voilà ce que nous avons trouvé en réponse à nos investigations lors de la rédaction du rapport du CNE. Je pense que, sur ce que je viens de dire sur les secteurs d'emploi, les personnes qui vont intervenir après moi pourront l'illustrer de façon plus vivante puisque c'est leur quotidien.

Pour conclure cette partie, ce qui nous avait beaucoup frappé, à la question : "Quelles perceptions les employeurs ont-ils de nos étudiants?", contrairement à l'idée trop souvent reçue et diffusée sur les étudiants à BAC+5, les employeurs n'attendent pas que ces étudiants soient immédiatement opérationnels, ils savent bien que ce n'est pas possible d'être directement opérationnel sur un poste, mais ce qu'ils disent, ce qu'ils constatent, c'est que nos étudiants sont rapidement opérationnels, ils sont formables sur le tas : on n'a pas besoin d'organiser pour eux une formation continue et puis ils notent aussi leur caractère professionnel et novateur, ce sont des gens dont la formation anticipe des méthodes utilisées dans les entreprises et ceci correspond à l'intérêt de formations qui s'appuient sur la recherche. Ensuite les utilisateurs avaient relevé que les étudiants étaient bien formés en informatique et c'est souvent un avantage qu'ont nos étudiants par rapport aux étudiants des écoles d'ingénieurs. Nous avons appris avec surprise que, dans les écoles d'ingénieurs, on fait moins d'informatique que dans les universités et souvent nous avons constaté que nos étudiants se plaçaient bien sur le marché parce qu'ils avaient ce plus. Le bémol, même si Toulouse s'en tire mieux que les autres, c'est que nous n'avons pas assez de formation en statistiques et en bio-statistiques. Aux biologistes on leur apprend quelquefois des mathématiques, mais c'est peut-être plus facile d'apprendre de la biologie à des

statisticiens que des statistiques à des biologistes. Les mathématiques ont quelque chose de particulier : lorsqu'on s'est arrêté pendant quatre ans il est très difficile de s'y remettre ; j'ai été amenée à faire des programmes de mathématiques, pour des formations professionnelles destinées à des personnes qui n'avaient plus fait de mathématiques depuis le bac : ceux qui enseignent les mathématiques dans ces conditions comprennent la difficulté de l'entreprise ! Donc nous avons une faiblesse en statistiques et en bio-statistiques, c'est un terrain à piocher. Que puis-je dire d'autre en conclusion ? J'espère que 2003 n'est qu'une mauvaise passe ; la situation me rappelle terriblement 1993. Je me souviens d'une réunion où plusieurs responsables de DEA et de DESS et des responsables de services de recherches dans les entreprises discutaient ; nous leur demandions ce qu'il souhaitaient : des BAC+2, des BAC+5, des BAC+8 et, en plaisantant à demi, l'un d'eux avait dit : "Des BAC+12, car pendant ce temps-là ils ne seront pas au chômage !" ; j'étais avec Nicole El-Karoui et nous avons fait une triste mine, et puis en 1993, il y a eu une mauvaise passe, comme pour cette année 2003, des étudiants ont mis un an pour trouver du travail, mais en 1993 la situation était différente : il y avait un montée des effectifs et nous avons remonté la pente, nous avons formé des gens, mais actuellement, nous sommes dans une situation beaucoup plus difficile au point que le recteur de la région Midi-Pyrénées nous a fait parvenir, à nous qui devons présider des jurys de Bac, ces statistiques pour que nous soyons les apôtres de la formation scientifique. A l'échelon national : 32,5 % des Bacs S vont vers des filières non-scientifiques. En regard, précisons les besoins : on manque de candidats enseignants -dans notre académie, nous n'avons eu que 150 candidats pour 133 places à l'IUFM, c'est tout à fait insuffisant- nous avons un déficit de 30% au niveau de la licence, nous manquons de techniciens- en France, nous manquons de techniciens !- il manque 25 % au niveau des masters-masters professionnels- je ne parle pas de la recherche, mais c'est peut-être pour d'autres raisons, car pour des raisons économiques, la recherche n'a pas le vent en poupe. Ma conclusion est un peu désabusée : peut-être allons-nous nous en sortir quand même, mais en ce moment nous avons un système qui marche un peu sur la tête, nous avons les meilleurs bacheliers scientifiques dans les classes préparatoires ils intègrent quelquefois dans des écoles d'ingénieurs, pas toujours, mais une grande partie. Quelques uns, et c'est peut-être un point positif, au lieu d'intégrer un école d'ingénieurs de seconde catégorie, vont à l'université suivre une filière qui leur permettra d'être ingénieur à un niveau à peu près égal à celui d'un ingénieur issu d'une école, mais avec un salaire inférieur car il n'a pas eu le label des grandes écoles. Les bacheliers suivants vont dans des IUT, soit disant pour être techniciens, mais 90% des diplômés des IUT continuent jusqu'à BAC+5. Résultat : on a besoin de techniciens, mais ceux qui sont formés pour être techniciens, ne sont pas techniciens car ils continuent et les bacheliers les plus faibles vont à l'université avec des conditions moins bonnes que dans les IUT lesquels proposent un encadrement bien meilleur et des effectifs limités ; quelques étudiants s'en sortent, vous en connaissez, certains arrivent en ayant eu cette formation, ils ont bravé les obstacles, quand ils sortent à BAC+5 ils sont trempés comme de l'acier et très compétitifs sur le marché du travail, moyennant quoi,

ceux qui ont un DUT reviennent à l'université, pour faire un BAC+5, pour aller jusqu'à un DESS par exemple, avec le gros inconvénient qu'ils ont eu une formation de début, juste après le bac, impropre à former des ingénieurs mais propre à former des techniciens et ce n'est pas la même chose : on ne forme pas de la même façon un technicien et un ingénieur. Pour ma part j'ai eu affaire à ce genre de public et je trouve difficile de les reconverter à la nécessité du raisonnement, à la nécessité d'établir des preuves, et à les convaincre que les mathématiques ne donnent pas des recettes qu'on puise dans une collection de fiches. Je voudrais dire que nous avons un potentiel de formation qui est tout à fait honorable, reconnu. Je dirai un petit mot des IUP qui donnent une formation à BAC+4 et j'espère que le LMD les obligera à se fondre dans des masters professionnels, les DESS vont s'appeler masters professionnels, - on aura sans doute un problème de lisibilité - mais il faut à tout prix que nous tenions à cette qualité qui nous est reconnue sur le marché du travail.

G. P. : Merci beaucoup Monique. Dans l'auditoire y a-t-il des questions ou des commentaires suscités par cette intervention ?

Jean-Michel Vacheron de la société Michelin : Je voudrais avoir votre opinion car les mathématiques concentrent un petit peu des problématiques qu'on trouve dans d'autres sciences exactes, dans les sciences dures. D'où vient cette désaffection des jeunes pour les sciences dures ? Trop difficiles ? Pas suffisamment bien payées ?

M. P. : Les deux, c'est dur, c'est difficile ! En parlant à un représentant des Etats-Unis je sentais venir l'évocation de la baisse des effectifs, sur ce point son commentaire fut : " Chez nous il y a longtemps que c'est comme ça les jeunes s'orientent vers des activités de managers, d'avocats car ces activités rapportent " ; on retrouve les étudiants dans les facultés de droit, d'économie et aux Etats-Unis, les sciences et les techniques sont faites par des transfuges venant de pays d'autres continents, c'est une évolution. Pour nous c'est grave car en France nous avons une bonne école mathématique qui est réputée sur le plan international, mais je ne sais pas pour combien de temps ! Il y a aussi des rumeurs diffusées par la presse du genre : " Quand on fait des mathématiques, c'est dur ". Il suffit de dire à des interlocuteurs, - médecins, dentistes - que l'on est mathématicien pour s'attirer des réponses du type : " Qu'elle horreur, je détestais ça ! ". Le mathématicien a une image répulsive ; de plus les conseillers d'orientation et les journalistes s'obstinent à dire que les mathématiques ne mènent qu'à l'enseignement, lequel est aussi un peu répulsif en ce moment car il n'est pas facile d'être professeur de collège. Nous n'avons rien pour plaire et nous avons un gros travail à faire pour la réhabilitation de notre image.

Olivier Pironneau : Je voudrais rajouter un mot à ce qui vient d'être dit. Je crois qu'il y a eu des analyses de fond dans les journaux sur ce problème : la France est particulièrement touchée par la désaffection des carrières scientifiques et pas seulement en mathématiques. On a pu identifier un seul dispositif évident : les 35 heures ont fait augmenter les besoins en animateurs, par exemple, professeurs de sport, ce qui a engendré clairement une demande de ce côté-là au détriment des

choix orientés autrefois vers les carrières scientifiques. Une autre cause de cette désaffection est que la science a mauvaise presse pour des raisons discutables, c'est vrai en particulier pour le nucléaire, de même tout ce qui touche au domaine de l'écologie fabrique une argumentation tendant à accuser la science de tous les maux de la société actuelle.

Jean-Pierre Bourguignon : Je suis mathématicien et peut-être sur cette question de la désaffection, je crois que si l'on veut traiter sérieusement le problème, il faut noter que la France n'est pas dans une situation singulière, il y a des pays où la situation pour les mathématiques est pire : l'exemple typique est la situation des Pays-Bas où, l'an dernier, le nombre d'étudiants inscrits en mathématiques à l'université était de 103, alors que la population de ce pays est de 15 millions d'habitants, le quart de la population de la France, il était aux environs de 850 dans les années 1990 et à cette époque ce nombre était déjà jugé catastrophique. Il semble que nous ne soyons pas encore au fond du fond !

Je veux dire aussi qu'il est très important, et cela me gêne beaucoup, que dans les études qui ont été faites sur ces problèmes, études venant du ministère de l'éducation nationale et de la recherche, elles sont limitées à l'aspect quantitatif qui montre un certain nombre de choses et je pense que ce n'est pas suffisant pour au moins deux raisons : la première est qu'il serait important d'avoir une étude qualitative pour bien séparer les différentes causes, Pironneau a dit qu'il existait une composante de nature idéologique or généralement les composantes idéologiques ont une durée de vie beaucoup plus longue que les composantes liées au marché du travail, il y aurait donc une nécessité de faire une étude sociologique des motivations des jeunes ou l'absence de motivations. La deuxième chose qu'il me paraît nécessaire de souligner porte sur les remèdes et il n'est pas du tout clair que les remèdes soient toujours les mêmes, je pense qu'en séparant les causes qui n'ont pas les mêmes périodes et en appliquant des remèdes qui ne s'appliquent pas aux mêmes personnes et aux mêmes motivations on aurait peut-être plus de chance de s'en sortir, mais ce problème est malheureusement significatif et une chose qui m'a scandalisé ces derniers jours c'est la liste des 56 personnes de la commission qui doit présider le débat sur l'école, je ne sais pas si vous l'avez lue en détail, mais il y a, sur 56 personnes, 4 scientifiques, 1 ingénieur, 5 philosophes, 6 journalistes,... ! Je dois dire que pour moi la chose la plus importante est que des gens qui savent ce qu'est la production des connaissances, la production de biens, soient présents dans ce contexte, il faut d'autres représentants qui connaissent l'école de l'intérieur ; que des gens qui vont être des employeurs des produits issus de l'école soient si peu représentés me terrifie. Cette commission a été constituée, c'est terminé ; enfin quand j'ai vu sa composition, j'ai été atterré !

Michel Théra : Sur ce point je dois dire que différentes associations, la SMAI, la SMF, la SFP, la SFC et d'autres, vont se réunir et écrire au Premier Ministre un courrier qui doit partir incessamment, ce soir ou demain, de manière à réagir très vigoureusement sur la composition de cette commission.

Véronique Chauveau, (femmes et mathématiques) : Nous avons écrit à Mon-

sieur Luc Ferry au mois de juillet en lui demandant une entrevue à propos de la désaffection des élèves pour la série scientifique et des difficultés de recrutement des enseignants, et sur une participation à ce grand débat sur l'éducation ; nous l'avons relancé, nous attendons et nous sommes aussi scandalisées de ne pas avoir été contactées.

Etienne Pardoux : Je suis assez d'accord avec les différentes choses qui ont été dites sur les causes de la désaffection des études scientifiques, mais je voudrais revenir sur un point souligné par Monique Pontier, c'est que les études scientifiques sont difficiles, elles exigent beaucoup de travail et de nombreux auditeurs dans cette salle le savent, mais que ce travail est passionnant. Je ne suis pas sûr que l'effort soit une valeur à la mode actuellement dans les jeunes générations : l'ambiance et les médias ne semblent pas encourager l'effort prolongé. Je voudrais aussi rebondir sur certaines choses qui ont été évoquées notamment sur les statistiques. C'est une évidence que la formation en statistique ne figure pas dans les traditions françaises, c'est peut-être le seul domaine des mathématiques où la France est faible, même si en mathématiques la France occupe le deuxième rang sur le plan mondial, ce qui n'est pas le cas dans aucune autre science, mais ce deuxième rang n'est pas vrai en statistique et je suis convaincu que l'un des besoins le plus fort en mathématiques dans l'industrie, dans les services, se trouve en statistique ; tout simplement avec l'explosion de l'utilisation des ordinateurs pour traiter ces gigantesques quantités de données stockées, il faut connaître les statistiques ; il n'y a pas de miracle ! L'informatique ne suffit pas, il faut aussi utiliser les outils de la statistique et il faut faire un gros effort pour surmonter cette faiblesse. Former des statisticiens correspond à un gros besoin pour la France. Sur un autre point soulevé par Michel Théra dans l'introduction à cette table ronde, point qui portait sur l'association des mathématiques à l'informatique et à d'autres disciplines, je dirai que si on veut être un mathématicien dans l'industrie, il faut aussi être informaticien. D'ailleurs je ne suis pas certain que les entreprises aient conscience qu'elles embauchent des mathématiciens, mais plutôt des informaticiens qui ont une petite compétence de plus en statistiques ou en calcul scientifique. Il est clair qu'il ne semble pas possible de former des spécialistes, des chercheurs et des enseignants en mathématiques qui n'auraient pas une maîtrise suffisante de l'outil informatique et, personnellement, je pense qu'il n'y a pas assez d'informatique dans nos enseignements des quatre premières années d'université. Pour des Bac+5 "professionnalisants" il est nécessaire de leur donner une formation plus importante en informatique, il faut les former à écrire des programmes. Par ailleurs les mathématiques peuvent être associées à beaucoup d'autres disciplines d'applications, biologie, chimie, mécanique, que sais-je ? Il me semble que nos formations DESS, si elles sont "professionnalisantes", doivent avoir un caractère relativement fondamental. En tant que responsable d'un DESS, j'ai été frappé par les réactions que j'ai recueillies dans des discussions avec des professionnels d'un laboratoire pharmaceutique à Marseille ; ils m'ont dit : "Ce serait bien si vous aviez des cours de bio-statistiques" ! Mais en fait nos formations sont moins spécialisées et nos étudiants vont dans les

banques, les assurances,... Finalement mes interlocuteurs ont reconnu que l'absence d'un complément en bio-statistiques n'était pas trop grave dans la mesure où les étudiants qu'ils embauchaient avaient une formation mathématique solide, l'aspect biologie, pharmacie, médecine pouvait s'acquérir sur le tas. Cette remarque rejoint ce que disait Monique Pontier : une certaine polyvalence à caractère fondamental, ce qui donne une grande adaptabilité, et il faut continuer dans cette direction ; il ne faut pas que les étudiants soient enfermés trop tôt dans un créneau.

Juliane Unterberger : Je voudrais connaître le point de vue des embaucheurs ; ils vont remplacer les scientifiques par d'autres étudiants qui ont eu des formations différentes et la conséquence est que l'on pourrait se passer de mathématiciens et notamment de ceux qui sont titulaires d'un DESS de mathématiques. Une dernière remarque : j'ai un fils qui est stratégeste à la Société Générale, il me dit qu'il ne peut pas trouver de bons statisticiens en France et qu'il doit faire appel à des étrangers.

G.P. : Merci, on va entamer la deuxième partie de cette table ronde. Ce qui semble se dégager de l'intervention de Monique Pontier et de celles qui ont suivi, c'est qu'il existe une articulation importante entre connaissances mathématiques, modélisation, programmation et utilisation de logiciels scientifiques, et je pense qu'aujourd'hui nous n'avons pas fini de tourner autour de ces trois pôles.

M.T. : Pour répondre à Madame Unterberger, la réponse pourra lui être donnée dans la seconde table ronde.

G.P. : La seconde table ronde sera constituée uniquement d'intervenants qui travaillent dans l'industrie et les services ; autour de cette table certains participants travaillent également dans l'industrie et les services et ils pourront apporter des réponses moins provocantes que la question mais il était bon de la poser. Je laisse la parole à Aurélien Schmied qui vient de débiter sa vie professionnelle à la suite d'études de mathématiques : il va vous expliquer quel usage il fait des mathématiques.

Aurélien Schmied : Pour illustrer cette table ronde sur la formation aux métiers des mathématiques dans l'entreprise, je vais vous présenter rapidement mon parcours et ma première approche de l'entreprise par la thèse CIFRE. Je définirai en quelques mots le sujet et je mettrai en place le schéma de fonctionnement et je donnerai mon point de vue sur cette formation par la recherche ; enfin je parlerai de mon métier actuel.

Je travaille chez RENAULT après le parcours suivant : j'ai un cursus universitaire classique en mathématiques : DEUG, licence de mathématiques, maîtrise d'ingénierie mathématique, avec déjà un côté un peu appliqué, à l'université d'Aix-en-Provence ; puis le DEA de probabilités appliquées et applications filières appliquées à Paris VI, puis une thèse CIFRE au laboratoire de probabilités à Paris VI et à la direction de la recherche chez RENAULT. Cette thèse porte sur les "Méthodes stochastiques d'optimisation appliquées à la mise au point moteur". Depuis, j'ai été embauché chez RENAULT et ma fonction est celle d'ingénieur de

recherches ; je parlerai des applications que je suis amené à traiter.

Le premier point de contact avec l'entreprise a été la thèse CIFRE et je vais essayer d'expliquer en quelques mots le sujet que j'ai traité : la mise au point-moteur. C'est une question d'actualité qui consiste à minimiser la consommation des véhicules tout en respectant des normes de pollution de différents pays et en garantissant le confort de conduite pour les passagers et le conducteur ; il faut donc concevoir un réglage du moteur qui doit s'effectuer en un temps minimum. Pour cela on formalise le problème de manière un peu plus mathématique : si on considère le domaine de fonctionnement d'un moteur on va le séparer en 15 points caractéristiques, ce qui revient à définir le problème de la mise au point-moteur de la façon suivante : il s'agit de trouver 6 réglages différents sur chacun de ces 15 points, ce qui revient à minimiser une sorte de somme de la consommation en respectant des limites sur les émissions pondérées de certains polluants. On a aussi des contraintes sur le bruit, sur le confort, les à-coups et les désagréments lors de la conduite. Sans rentrer dans les détails, soulignons qu'on a une partie modélisation qui permet d'explicitier des paramètres de consommation, des émissions et de bruit à partir de modèles paramétriques ; on arrive alors à un problème d'optimisation dont je donne ici quelques caractéristiques. On a, en gros, 100 réglages à paramétrer et un grand nombre de contraintes : 5 contraintes de norme de limitation sur les polluants, 90 contraintes de lissage sur la limitation des à-coups, 15 contraintes sur le bruit. Ce qui conduit pour ce problème à 3000 minima locaux, ce qui est considérable. Il faut aussi tenir compte de l'évolution des normes et la complexité des moteurs s'adapte, le nombre de paramètres de ce problème explose petit à petit, ce qui entraîne pas mal de difficultés. Pour résoudre ce problème, notre approche a été la suivante : on a considéré que la modélisation était faite et on connaissait les modèles paramétriques figurant dans le problème d'optimisation. On a testé une méthode de type SQP utilisant le calcul du hessien, mais une telle méthode a conduit à un minimum local qui ne correspondait pas au minimum souhaité ; on a ensuite testé une méthode de recuit simulé qui, sous certaines hypothèses, donne le minimum global, mais une telle méthode est un peu difficile à paramétrer et la dernière phase de convergence est plus lente qu'une méthode utilisant le hessien ; on s'orienta donc vers une méthode du type "multistart" qui génère de manière aléatoire des points de départ de méthodes SQP, ce qui est plus facile à paramétrer, mais la génération aléatoire des points n'est pas nécessairement optimale ; on a donc développé un nouvel algorithme entre le recuit simulé et le multistart, méthode qui permet d'avoir des points aléatoires, c'est-à-dire d'explorer les différents bassins d'attraction et ensuite d'adapter une méthode SQP pour avoir une convergence plus rapide. Cette méthode était bien adaptée à notre problème et elle permettait de converger assez vite vers le minimum global du problème, mais par contre, on a seulement quelques éléments sur la convergence, moins que dans le cadre du recuit. Cette méthode est appliquée à un problème industriel. Voilà pour la présentation du sujet.

Pour le déroulement de la thèse CIFRE voici une idée des différentes phases : à

la direction de la recherche chez RENAULT le problème a été formulé et on a fait une sorte d'état de l'art des différentes méthodes utilisées et des méthodes envisagées, puis avec le laboratoire de Paris VI, j'ai utilisé l'expertise de ce laboratoire sur les algorithmes stochastiques pour tester et paramétrer les algorithmes existants, ce qui a conduit à mettre au point un algorithme adapté au problème.

Mon point de vue sur la thèse CIFRE est qu'elle a été l'occasion d'assimiler des techniques sur un cas concret et j'ai pu suivre toutes les étapes de la résolution en commençant par la modélisation, que je n'ai qu'ébauché ici, puis en poursuivant par la recherche d'une solution adaptée et enfin la programmation qui montre que, dans l'industrie, l'informatique est indispensable, et enfin la validation a été suivie de la mise en œuvre opérationnelle. Actuellement la méthode de mise au point utilise l'algorithme qu'on a développé. Pour moi ce travail de recherche a été valorisé par les résultats dans l'entreprise et il m'a aussi permis de comprendre le fonctionnement de l'entreprise, de prendre connaissance de ses objectifs et surtout cela m'a donné une voie d'accès à l'entreprise par les mathématiques. Depuis je traite un nouveau sujet qui porte sur l'allègement de la caisse : il s'agit de minimiser le poids de la caisse en jouant sur les épaisseurs de la tôle tout en garantissant le bon comportement d'une voiture dans différentes situations de chocs. Schématiquement, on étudie le cas d'une voiture qui subit un choc latéral, mais on doit aussi limiter les vibrations de la caisse lors du roulage. Les calculs utilisent des éléments finis, mais ils sont très lourds et exigent beaucoup de temps- calcul alors on étudie le problème à l'aide de modèles paramétriques ce qui conduit à utiliser l'optimisation et la modélisation.

G.P. : Notre collègue invitée n'est pas présente, je le regrette et je pense que l'association "Femmes et mathématiques" ne m'en voudra pas. Je souhaitais sa présence pour qu'elle illustre un parcours de quelqu'un qui a fait des mathématiques son cursus principal jusqu'à la maîtrise et qui ensuite a bifurqué vers un DESS double compétence : une formation scientifique initiale et une formation en informatique. Aujourd'hui elle travaille dans une société et elle vous aurait sans doute dit combien les mathématiques l'aident dans son travail au quotidien, non par l'usage qu'elle en fait, mais par la formation acquise. Il n'est pas possible de remplacer les absents !

Je vais poser une première question à Aurélien en lui demandant s'il estime qu'il est suffisamment bien payé compte tenu de la difficulté des études. Il semble que des auditeurs de cette assemblée se posent aussi cette question !

A.S. : Déjà, il semble que je sois bien payé, par contre il faut voir que je suis moins bien payé qu'un ingénieur qui a la même formation ; à formation égale un ingénieur issu d'une école serait mieux payé que moi, mais mon salaire reste tout à fait raisonnable.

G.P. : D'autres questions puisque les mathématiciens ne s'intéressent jamais à l'argent !

Michaël Gutnic, maître de conférences à Strasbourg. Les deux questions suggérées par ton témoignage concernent l'externalisation de la recherche dans les entre-

prises. On assiste à un phénomène d'externalisation de la recherche dans les entreprises, c'est-à-dire qu'elles vont chercher des compétences de chercheurs à l'extérieur au risque de pertes de compétences techniques en leur sein. On a un bon exemple de ce phénomène à la RATP qui a perdu beaucoup de compétences techniques compte tenu de ses besoins, mais elle externalise de plus en plus sa recherche et développement. Je crois aussi savoir que le budget des bourses CIFRE, alloué chaque année est absolument loin d'être consommé complètement par les thèses, ceci prouve que les étudiants qui abordent une thèse n'ont pas vraiment envie d'aller faire des thèses en entreprise, de plus il faut trouver des entreprises qui assurent la moitié du financement. Par ailleurs les titulaires de thèses CIFRE ont-ils des débouchés ? Es-tu une exception ou la règle en ce qui concerne les bourses CIFRE ?

A.S. : En ce qui concerne RENAULT, une personne sur deux est embauchée après une bourse CIFRE ; j'ai été embauché il y a deux ans et je n'ai pas les dernières statistiques d'embauche. Il est vrai que pour RENAULT la recherche est assez externalisée, en fait on nous demande de localiser les compétences dans les universités, d'aller les chercher et de les appliquer à des projets, à des cas concrets. Il n'y a pas de métier consistant à trouver la convergence d'un algorithme ; cette activité est en train de disparaître. Il existait une composante de ce type autrefois chez RENAULT, mais actuellement ce n'est plus l'orientation.

Juliane Unterberger : Je voudrais savoir si, chez RENAULT, il y a d'autres personnes qui ont une formation mathématique et si, quand on entre et qu'on est apprécié parce qu'on a des techniques nouvelles, modernes qui au bout d'un certain temps, faute de recyclage peut-être universitaire, deviennent moins opérationnelles, on ne risque pas d'être renvoyé. J'ai l'exemple d'une ancienne étudiante titulaire d'un doctorat de mathématique appliquée, rentrée chez RENAULT et qui a perdu son emploi au bout de quelques années. Je m'inquiète un peu du devenir de ce genre de travail !

A.S. : Je ne connais pas ce cas et je n'ai jamais entendu parler d'une personne renvoyée de chez RENAULT. Je ne suis pas seul, j'appartiens à un groupe de six personnes travaillant, dans l'entreprise sur l'optimisation et de modélisation. D'autres, avec la même formation que la mienne, sont à la direction de la recherche mais nous sommes loin d'être majoritaires si on nous compare avec le groupe travaillant en ingénierie. Notre métier n'est pas le coeur de RENAULT, mais on existe et l'entreprise a besoin de nous.

Georges Kalpak : Ingénieur de recherche appliquée. Ma question est un peu politico-économique. Concernant les moteurs, un sujet m'intéresse : je me demande si en France et dans le Monde il n'y avait pas un lobby dont le rôle est de défendre les moteurs à essence plutôt que de faire de la recherche sur les moteurs électriques.

A.S. : Je ne sais pas trop si un lobby existe, pour ce qui me concerne je travaille sur les moteurs diesel. RENAULT s'oriente plus vers le diesel et NISSAN plus vers les moteurs à essence.

Question d'une documentaliste de l'ONISEP : Je m'occupe des études scientifiques. Ma question est beaucoup plus générale et s'adressera peut-être plus à Madame Pontier. Quand on parle des métiers des mathématiques, c'est un terme large, alors que l'on emploie assez peu le terme de mathématicien, on parle plus d'ingénieur de recherches, de mathématiques appliquées, d'actuariat ou de domaines applicatifs ; ma question est toute simple : Pourquoi en terme d'appellation on utilise assez peu le terme de mathématicien ?

M.P. : On ne dit pas en général qu'on est mathématicien, il s'agit plutôt d'une terminologie utilisée par les enseignants-chercheurs, la terminologie évoquée lorsque j'ai parlé des jeunes diplômés de Toulouse utilisait les termes de fonction : chargé d'études dans des secteurs où on a besoin de mathématiques ; on n'utilise pas uniquement des mathématiques, comme le soulignait Etienne Pardoux. En fait, il s'agit d'activités pluridisciplinaires et ce n'est pas limité aux mathématiques, la composante informatique est absolument indispensable, mais contrairement à ce que disait Etienne, les étudiants qui ont un bagage mathématique ont un avantage si on compare leur situation à celle des étudiants qui n'auraient qu'une formation en informatique. Il existe une demande de gens qui ont une culture relativement large. Il n'existe pas de secteurs où l'on peut se placer lorsqu'on a fait des études approfondies jusqu'à Bac+5, la formation mathématique doit être complétée d'informatique, d'actuariat, d'économie, de biologie ou d'agro-alimentaire ; la spécialisation pouvant venir par les stages. Mais mathématicien n'est pas un nom de métier : on n'est pas mathématicien chez RENAULT. A la rigueur on peut dire que statisticien est un métier, même si on est un peu faible en statistiques pour des raisons historiques : les premiers statisticiens ont été les inspecteurs des impôts, fort mal vus en France, ce sont eux qui ont calculé l'assiette de l'impôt, ce qui fait dire à certains que les statistiques ont mauvaise presse. On a du retard par rapport aux chercheurs du 19^e siècle : nous avons Jules Bienaymé, inspecteur des impôts sous Napoléon, mais en Angleterre les chercheurs en statistiques sont très nombreux. Pour donner un exemple, si on demande par exemple un bio-statisticien, on ne cherche pas un mathématicien, on demande un chargé de recherche avec une formation d'école d'ingénieur ou DESS à dominante mathématique. Il faut analyser les offres d'emploi pour cibler les demandes, le libellé des offres d'emploi est intéressant à consulter pour connaître les profils souhaités par les entreprises.

Question. Une question sur l'externalisation de la recherche. On est amené à utiliser des codes ; les grands codes sont connus, toujours les mêmes, ils appartiennent à des sociétés commerciales relativement fermées. Comment, en tant qu'utilisateurs de ces codes, pouvez-vous gérer un double risque du fait de l'utilisation d'un code du commerce ? D'un côté si un universitaire a une idée originale il lui sera très difficile de percer parce que les sociétés sont fermées et qu'on ne maîtrise pas la politique des éditeurs de codes ; d'un autre côté certaines sociétés s'effondrent comme on l'a vu récemment. Si on a un code de voiture et si l'éditeur n'existe plus que fait-on pour développer la prochaine voiture ?

A.S. : Il s'agit là d'un problème important. C'est une question de moyens : pour

les logiciels d'optimisation, certains codes sont développés par des entreprises américaines qui disposent de gros moyens. Pour RENAULT, il est moins coûteux d'acheter les codes, mais si l'entreprise éditrice de codes s'écroule on fera appel à ses concurrents, mais il s'agit là un réel problème.

Olivier Pironneau : J'ajouterai qu'il y a un précédent avec le logiciel EUCLIDE qui a été acheté par RENAULT quand l'entreprise éditrice s'est trouvée en grande difficulté, l'entreprise a quand même fait faillite, mais plus tard !

G.P. Je voudrais relancer le débat sur le problème de l'externalisation de la recherche, car il faudrait peut-être faire la part entre ce problème et celui des contacts entre l'industrie et le monde universitaire ; faire une thèse CIFRE peut être utilisé comme une espèce de veille technologique ou de tête chercheuse au sein de l'université pour arriver à des transferts de technologie. Mais pourquoi pas ? En mathématiques appliquées on est notamment là pour cela, je le pense. L'externalisation de la recherche est sans doute autre chose que le fait de développer des relations avec l'industrie ; c'est mon point de vue.

Question : J'ai passé quelques années dans une école d'ingénieurs et j'ai une formation en ingénierie mathématique. Je trouve qu'à cette grande force donnée par une formation mathématique ce qui manque le plus est la contrepartie de recherche industrielle. Je pense que l'ouverture n'est pas suffisante de la part des industriels qui devraient se tourner vers l'université pour proposer des embauches d'avenir dans les métiers des mathématiques. L'université est capable de former et de s'adapter, mais la contre partie qui devrait venir des industriels n'est pas là. La France dispose de très bons ingénieurs, mais son industrie est en train de tomber ou au moins de prendre du retard et ce retard, c'est connu, est dû à un manque de modélisation dans les mathématiques. J'attends des industriels qu'ils viennent nous poser des questions.

A.S. : Chez RENAULT, j'ai été embauché l'an dernier en même temps qu'un titulaire d'une thèse universitaire suivie d'un post-doc à l'INRIA, il est vrai que je ne connais pas de technicien en mathématiques.

G.P. : Il s'agit peut-être là d'une spécificité des mathématiques sur laquelle on peut s'interroger. Avant Bac+5 il est pratiquement impossible de trouver un métier sur les bases d'une formation mathématique, alors que dans les autres disciplines, ce n'est peut-être pas courant, mais cela s'avère possible. En mathématiques il semblerait que l'on puisse trouver un emploi satisfaisant, mais c'est difficile et cela prend plus de temps.

M.P. : A Bac+5, je peux vous donner des exemples où beaucoup d'étudiants, pas tous, ont été casés au bout de trois mois ou six mois ; pour les autres la durée de la recherche a pu s'étaler sur une période de six mois à un an. Il reste des diplômés de la promotion de 2002 qui sont encore en recherche d'emploi, ce qui ne s'était pas produit les années précédentes, mais RENAULT embauchent à Bac+5, de même que les Mutuelles du Mans, de nombreuses entreprises embauchent à Bac+5, elles sont satisfaites et elles redemandent des titulaires du DESS. Le problème actuel est une frilosité dans les services de recherches des

grandes entreprises qui n'embauchent pas, pas plus dans le secteur privé que dans le secteur public. Actuellement les services de Recherche et Développement n'embauchent pas, d'ailleurs l'ensemble du marché du travail est plutôt morose. Nous sommes représentatifs d'une situation d'ensemble et pour, autant que je le sache, par ce que j'ai appris dans une des différentes réunions auxquelles j'ai participé. Une représentante de l'APEC a souligné que dans une situation de crise de l'emploi, en règle générale, les diplômés de mathématiques s'en sortent mieux que les autres diplômés d'université. (Commentaire dans la salle, inaudible). En général on ne demande jamais un mathématicien ; les statistiques de l'APEC, évoquées précédemment, concernent uniquement des DESS et des DEA et non les diplômés titulaires de thèse, car nous n'avons pas pu avoir les données correspondantes. Autant les responsables de DESS font des efforts pour assurer un suivi de leurs étudiants et les assiéger de courriels pour savoir quelles sont leurs demandes, ces responsables puisent sur leur temps libre car cette activité de suivi n'est pas prise en compte dans leurs services, autant les responsables de DEA et de thèses ne peuvent pas assurer ce travail énorme de suivi, je n'ai pas connaissance d'un tel travail fait actuellement. Lorsque le groupe chargé de l'évaluation a rendu son rapport il n'a pas pu savoir ce que devenaient les étudiants titulaires de thèse : il existe quelques résultats figurant dans les rapports d'organismes comme le Comité National des Universités ; on connaît le nombre de qualifications, d'habilitations et la SMAI fait des comptes sur le nombre de qualifiés et d'habilités qui ont été nommés sur des postes de maîtres de conférences ou de professeurs. Ces données peuvent se trouver dans le bulletin de la SMAI.

Frédéric Guichard : (intervenant) Simplement, une remarque pour souligner que la situation n'est pas aussi noire, dans la société où je travaille : nous avons trois postes pour des mathématiciens et nous serions heureux de recevoir des CV. Nous avons noté une très nette évolution par rapport à l'an dernier : l'an dernier je recevais environ 25 CV par mois, depuis mars de cette année je dois être à trois CV par mois seulement. Les trois postes demandent certaines compétences ; ces postes, ouverts depuis mars, sont toujours vacants.

G.P. : Vous aurez plus d'informations sur ces postes dans l'intervention de Frédéric Guichard.

Eric Langlard : (Directeur du département génie mathématique de l'INSA de Rouen). Le département a été créé en 1997, il forme des ingénieurs mathématiciens. Beaucoup de choses empreintes de pessimisme ont été dites, nous avons une petite expérience et depuis la création, nous formons des promotions de 50 étudiants, nous avons une demande toujours accrue et je peux dire que les étudiants se placent toujours sans problème. A l'INSA, nous avons des sections de mécaniciens, de chimistes, etc. mais ce sont les mathématiciens qui se sont les mieux placés.

G.P. : Nous allons aborder la troisième partie de cette table ronde avec l'intervention de professionnels, responsables d'équipes qui vont nous parler de l'utilisation des mathématiques dans l'entreprise. C'est Nicolas Gaussel de la Société Générale qui va nous parler d'argent !

Nicolas Gausse : Je travaille dans une filiale de la Société Générale dont l'objectif est de gérer les portefeuilles des clients ; je suis chargé d'encadrer une équipe qui travaille sur la modélisation ce qui est assez standard en recherche et développement. Avant de décrire ce que je fais au quotidien et les profils que nous recherchons, je vais parler des avantages et des inconvénients des formations mathématiques et de mon parcours.

J'ai commencé mes études supérieures à l'École centrale de Paris ; à la suite d'un désintérêt pour les mathématiques car j'avais l'impression qu'elles étaient gravées dans le marbre et que je n'avais pas grand-chose à y découvrir, j'ai fait un DESS d'économie qui ne m'a pas intéressé non plus mais qui m'a fait découvrir la modélisation en économie et tous les problèmes qu'elle posait. J'ai ensuite fait une thèse en économie mathématique et financière, puis je suis rentré au CCF. Par la suite j'ai pris la responsabilité d'une équipe dans la filiale de la Société Générale. Pour synthétiser les questions qu'on peut nous poser il faut imaginer des agents qui travaillent dans une banque comme optimisant des situations. Dans l'industrie des agents optimisent des critères complexes fonctions de plusieurs tendances en essayant de tenir compte de facteurs contradictoires. Par exemple gagner plus sans prendre de risques, le plus tôt possible, tout en voulant une situation pérenne, ce qui aboutit, si on n'y prend pas garde, à des systèmes complexes qu'on peut très rapidement ne plus comprendre ; ce qui est le cas si on adopte un point de vue naïf. En fait, l'intérêt des mathématiques est justement de pouvoir dans un premier temps poser proprement les problèmes et ceci est très fortement lié à l'esprit mathématique : rechercher des variables d'état, ne pas penser que tout est dans tout et se dire que, dans un premier temps, on peut rendre certaines quantités indépendantes et lorsqu'elles sont indépendantes on peut les étudier de façon plus simple, ne pas penser que toutes les quantités qu'on va manipuler sont "méchantes" mais qu'elles peuvent être "gentilles", régulières, dérivables et que l'on peut commencer à résoudre les problèmes dans des cas particuliers. On tâtonne, tant que le problème est mal formalisé il peut ne pas avoir de solution ou on peut obtenir des solutions idiotes, puis lorsqu'on commence à aboutir à des solutions qui collent à peu près avec l'intuition c'est que l'on a pas trop mal identifié les paramètres pertinents du problème. Ce travail est très proche de ce que l'on peut faire dans un esprit mathématique, malheureusement on n'y est pas préparé, en tout cas, je parle en ancien taupin, on est tous habitué à résoudre un problème et non à le poser. Une fois le problème posé et même si on ne connaît pas la solution, mais si les propriétés de la solution sont contenues dans la nature des hypothèses qu'on a formulées, tout revient à le vérifier et on passe énormément de temps à se demander lorsqu'on formule ces hypothèses ce que l'on fait réellement. En finances il existe un exemple canonique assez drôle : si on travaille sur les trajectoires des processus financiers, dans un premier temps on a envie de considérer qu'elles sont continues et dans ce cas on sait faire beaucoup de choses ; dans le cas des trajectoires discontinues on connaît aussi des résultats mais les conséquences sont fondamentalement différentes, alors que l'on pourrait penser que de toute façon travailler en temps discret n'est qu'un débat épistémologique, mais ce n'est pas vrai ! Une

fois le problème formalisé on fait plus appel à des compétences techniques : il faut utiliser des méthodes, des résultats. Par exemple, dans un cadre de calcul des variations, il faut connaître les méthodes générales, vérifier les hypothèses nécessaires et pour cela les connaissances des techniciens sont indispensables, ils sont des intervenants avec une vraie culture mathématique, avec une connaissance des résultats. Ainsi lorsque qu'on tombe sur une équation différentielle, on dispose de méthodes que l'on adapte à chacun des cas ; il existe là un champ de compétences assez vaste qui peut nous aider. La géométrie différentielle, l'analyse fonctionnelle, le calcul stochastique sont des outils classiques. Typiquement, dès que les problèmes sont posés si on s'adresse à des spécialistes, comme Marc Yor, ils disposent toujours de la loi qu'il faut pour résoudre le problème et il s'agit là plus de culture et de compétences et moins de raisonnement. Dès que l'on a le résultat, il faut lui donner une réalité accessible à ceux qui ont posé le problème et c'est à ce stade qu'interviennent l'informatique, la programmation et l'analyse numérique. A partir d'une équation aux dérivées partielles on peut faire un calcul d'espérance soit par simulation, soit par toute autre des "12000" méthodes qui permettent d'extraire des formules à partir des graphiques de manière à rendre palpable ce qui a été modélisé. J'ai essayé de décrire un peu la chaîne des raisonnements que l'on fait, puis à toutes les étapes de cette suite j'ai essayé de préciser les profils des intervenants, pour définir ces profils recherchés- en référence au LMD. Il faut souligner que la maîtrise des calculs mathématiques faits en entreprise est fondamentale : ces calculs ne seront pas vérifiés car nous sommes les spécialistes du sujet, si on se trompe, personne nous le dira sauf si les résultats obtenus sont aberrants, mais le cas le plus difficile peut se produire si on se trompe un petit peu ! Les résultats ont une apparence correcte, mais en fait ils ne sont pas acceptables. Ce qui implique par exemple que la maîtrise du programme de terminale se fait au niveau de la taupe ; pour savoir dans quelles conditions on peut faire des dérivations, des intégrations, pour être certain que l'on ne dit pas de bêtises il faut avoir un très haut niveau d'études. Ainsi le niveau minimum en entreprise pour faire de l'optimisation correspond à Bac+5. Pour poser les problèmes et prévoir l'existence d'une solution pertinente il faut considérer qu'un niveau doctorat est nécessaire. Dans mon domaine de la modélisation financière, domaine qui commence à être connu, je donnerai quelques indications sur ce qu'il faut connaître lorsqu'on aborde les problèmes posés. Prenant le cas de l'allocation de portefeuille où on a le choix entre une opération qui peut rapporter beaucoup mais de façon incertaine et avec des risques, et une opération qui peut rapporter moins mais de façon certaine, comment définir le comportement optimal de l'opérateur ? Il faut commencer par un travail statistique et empirique pour pouvoir modéliser, par exemple l'incertitude à laquelle je me trouve confronté. En finance je dois trouver les processus pertinents pour rendre compte de l'évolution future des cours, d'où des choix dans la zoologie des processus qui ont des caractéristiques différentes, c'est là une des étapes difficiles et on ne sait pas ce qui peut se produire au moment où on fait ces choix, il s'agit ici d'un travail mi-mathématique, mi-statistique. Il faut ensuite examiner les critères et c'est aussi une situation délicate qui dépend de ce que l'on souhaite, mais on dispose ici de

toutes les connaissances acquises en économie mathématique, connaissances qui introduisent les espérances d'utilité. Tout ce que l'on vit au quotidien, c'est le cas dans ma pratique, revient à avoir une idée des critères utilisés par les clients, car personne ne vous dira quelle fonction mathématique il utilise. Comme les clients peuvent être considérés comme des systèmes experts ils ont une vision beaucoup plus complexe de ce que l'on peut modéliser, mais on peut s'accorder avec eux sur le choix d'hypothèses et leur demander des indications sur leur comportements dans des situations définies. Ceci revient à préciser des critères de choix, puis à définir des contrôles, à analyser les contraintes, à se demander si ces dernières sont pertinentes pour atteindre un résultat optimal. Il faut se poser des questions sur ce que l'on doit, ou ce que l'on peut, faire : vendre, à découvert ou non. Dès que toutes ces données sont formalisées il faut poser le problème, s'assurer qu'il est bien posé, vérifier la validité de ce qui est écrit en se référant aux connaissances "livresques". Il faut ensuite résoudre ce problème et aller le plus loin possible dans l'analyse mathématique et la résolution numérique. On doit enfin dégraisser tout ce qu'on a fait à partir des concepts mathématiques et rédiger les résultats en français en les débarrassant des termes mathématiques pour les présenter aux interlocuteurs qui ont posé le problème initialement. Il faut à cette dernière étape s'interdire de parler d'intégrales stochastiques, de processus de Lévy : c'est un bon exercice de définition lisible des concepts, car ceux-ci sont très intelligibles par "Monsieur tout le monde". Un écueil à éviter est le côté un peu joueur du mathématicien ; à la différence des juristes et des économistes qui ont une vue plus globale des problèmes, il peut se laisser emporter par des caractères un peu marginaux, par exemple l'optimisation du calcul de la vitesse d'une guillotine pour tuer un million de personnes en temps record ! Des problèmes de conscience de ce que l'on vient de résoudre peuvent quelquefois se poser. Il peut arriver que la résolution d'un problème de finance amène à la programmation d'une partie d'échecs ! Le mathématicien peut rencontrer des difficultés à cerner les exigences formulées par sa hiérarchie supérieure. Les mathématiciens souffrent à l'intérieur de l'entreprise, car ils ont l'impression d'être considérés comme des individus immatures.

G.P. : Pour gagner un peu de temps je souhaite que les autres intervenants s'expriment dès maintenant et des questions pourront être posées après les interventions.

Frédéric Guichard : Je voudrais surtout m'attarder sur mon parcours en partant de deux anecdotes qui sont tirées de mon parcours de mathématicien et d'industriel, ceci pour étayer ma vision des mathématiques appliquées perçues depuis mon entreprise. J'ai donc fait l'Ecole normale supérieure en mathématiques, j'ai fait des mathématiques sans trop savoir dans quelle direction j'allais m'orienter, j'ai suivi les cours à l'Ecole et j'ai eu un éventail de connaissances très large en mathématiques, mais j'ai rapidement décidé de m'orienter vers les mathématiques appliquées, je voulais réaliser des produits et j'ai choisi de faire le DEA d'analyse numérique de Paris VI. Ces études m'ont beaucoup plu, mais, à l'époque, ceci était mal perçu à l'ENS, où il était dit que j'allais faire des mathématiques

"cool", - je n'ai pas trouvé cela "cool" !- j'ai trouvé que l'enseignement était très théorique et qu'il y avait très peu d'applications dans un DEA de mathématiques appliquées. J'ai eu la chance de faire un stage dans l'entreprise Thomson - elle a changé de nom depuis - dans un service où on cherchait à optimiser des trajectoires de bateaux, problème de type jeux différentiels, - course poursuite chat-souris- en fait je ne connais pas les résultats obtenus pour les sous-marins, mais l'étude a servi à Marc Pajot pour la préparation de l'America-Cup en 1992, toutefois la compétition a été perdue ! Mais cette activité m'avait enthousiasmé et m'avait donné envie de continuer dans le domaine des jeux différentiels et je suis allé voir Pierre-Louis Lions qui travaillait sur ce sujet, mais il m'a déconseillé de me lancer dans cette direction en me disant que le sujet était déjà très largement traité et qu'il n'y avait plus rien à faire dans ce domaine. Je pense que beaucoup de résultats nouveaux ont été obtenus dans ce secteur de recherche. Pierre-Louis m'a présenté à Jean-Michel Morel qui s'intéressait au traitement d'image ; c'est un secteur qui était plus proche, initialement, de l'informatique, mais les mathématiciens commençaient à l'étudier, il y a beaucoup de choses à faire et comme les informaticiens ne connaissent rien aux mathématiques ils gobent tout ce qu'ils entendent ; le sujet a un potentiel d'avenir énorme- je caricature un peu !- La porte des jeux différentiels m'était fermée, mais celle du traitement de l'image m'était largement ouverte et je me suis lancé dans un problème très spécifique du traitement de l'image : "Comment simplifier une image ?" Une image est en fait une multitude d'informations par pixels et à partir de cela le cerveau humain en déduit la présence d'objets. Au niveau informatique on ne sait pas faire grand-chose et un des problèmes est de passer de cette information atomique à une connaissance un peu plus structurée : une façon est d'éliminer une partie de l'information inutile, c'est une opération appelée "lissage" et depuis une trentaine d'années, voire plus si on prend en compte les travaux des psycho-physiciens du début du 20e siècle, des scientifiques avaient posé des fondations sur des simplifications possibles des images. Il fallait justifier des hypothèses que l'on rencontrait dans les articles et des modèles qui vérifiaient ces hypothèses, on avait presque un article pour chaque modèle. L'objet de la thèse que j'ai faite sous la direction de Jean-Michel Morel a été de partir de ces modèles et de classifier les modèles possibles : c'est un problème très mathématique et il est assez proche aussi de démarches qui se font en physique théorique. On part d'hypothèses d'invariances et on en déduit des équations qui vérifient des relations liées à ces invariances ; une surprise a été d'obtenir une équation qui vérifiait toutes les hypothèses que nous avons introduites, équation que nous avons appelé : "équation fondamentale du traitement de l'image". Et cette équation nous a valu d'être invités dans tous les congrès sur le sujet. C'est ainsi que je me suis retrouvé à faire une conférence de 3 heures dans un grand congrès de traitement d'image alors que j'avais fait une thèse de mathématiques et que je n'avais vu que des équations aux dérivées partielles, mais très peu d'images ! J'étais donc considéré comme un expert en traitement d'image en ayant vu que très peu d'images ! Sur le moment je n'ai pas été choqué, mais ce qui m'a surpris, c'est qu'à l'issue de cette grande conférence de Washington deux membres du FBI m'ont dit : "Mon-

sieur Guichard, vous êtes un grand spécialiste du traitement de l'image, voulez-vous venir voir notre laboratoire de traitement de l'image ; on a des problèmes à résoudre et vous pouvez peut-être nous aider". J'avais en tête les films de James Bond où tous les ordinateurs du FBI passaient des heures à résoudre des équations pour trouver des suspects et j'ai donc saisi l'occasion de visiter le laboratoire du FBI pour constater, premièrement que les problèmes qu'ils traitaient n'avaient rien à voir avec ce que je savais et deuxièmement que je ne comprenais pas leur langage. Cette visite m'a ébranlé moralement car je me disais que j'essayais de faire des mathématiques appliquées et chaque fois je me trouvais à côté des applications. Quelque chose n'allait pas ! Je sortais de quatrième année de l'Ecole normale et j'avais le choix entre prendre un poste à l'université ou rentrer dans les corps d'Etat ; il me semblait que le choix d'un corps d'Etat pouvait me convenir et j'ai signé pour le corps des Ponts, je pensais que ceci m'amènerait à traiter des problèmes concrets. Cette formation d'ingénieur des Ponts m'a beaucoup servie par la suite, mais j'avais gardé la nostalgie du traitement de l'image et j'ai donc poursuivi l'étude du sujet en parallèle avec ma formation d'ingénieur mais toujours d'un point de vue théorique.

Le problème du premier poste s'est posé à la sortie de l'Ecole des Ponts et dans le corps des Ponts j'ai cherché les domaines où le traitement de l'image existait. J'ai choisi l'INRED, un organisme qui s'occupe de transports, de sécurité et dont un département étudie la surveillance des routes ; l'optimisation des temps de transports par exemple en plaçant des caméras pour obtenir des images qu'il fallait traiter : la démarche était l'inverse de celle que j'avais suivie dans mes études ; je devais maintenant partir d'images mais j'avais du mal à les raccrocher à la théorie. C'est ici que se place ma deuxième anecdote, après celle du FBI. A l'INRED, dans le département voisin, un groupe construisait des modèles de trafic automobile ; il existe beaucoup de modélisations du trafic, mais l'une d'entre elles s'appuie sur des équations aux dérivées partielles, ce qui me ramenait à mon secteur de connaissances et je discutais souvent avec les membres de ce groupe de modélisation, leur modèles étaient extrêmement compliqués et ils me plaisaient beaucoup. Le département où je travaillais décida un jour de placer des capteurs sur les voitures de manière à recueillir des informations qui pourraient être utiles pour concevoir des systèmes d'aide à la conduite et ceci à un horizon de dix à quinze ans, en terme de trafic et en terme de sécurité. Parfait ! Un laboratoire est spécialisé en modèles de trafic, je vais y aller avec mes projets futuristes des aides à la conduite et il existera peut-être dans quinze ans des véhicules équipés de systèmes d'aide à la conduite et il serait intéressant de confronter ces véhicules du futur avec les modèles de trafic pour étudier l'évolution des débits de véhicules sur le réseau routier du futur ! Dans la confrontation il est apparu que l'analyse du trafic mettait en jeu un nombre considérable de paramètres et que leurs réglages se faisaient à partir d'observations de ce qui existe et on doit régler ces paramètres sur ce que l'on observait. Malheureusement, les aides à la conduite sont prévues à un horizon de dix ans et bien entendu, aucune observation n'existe actuellement à cet horizon ! Je ne disposais donc d'aucun moyen de régler les paramètres de

trafic, j'ai donc cherché une méthode et nous avons trouvé, avec une seule hypothèse, un procédé de prévision des débits sur une route, procédé qui répondait aux impératifs des gestionnaires de trafic routier et ceci en utilisant Excel. On passait donc de modèles compliqués, avec un grand nombre de paramètres, à des modèles extrêmement simples en utilisant Excel, c'est-à-dire quelques lignes de programmes et un peu de bon sens ; de plus, les résultats obtenus étaient plus que satisfaisants pour ce qui concernait la précision. Et cette fois-ci encore j'ai été ébranlé par le fait que j'étais parti pour utiliser des équations aux dérivées partielles et on obtenait des résultats plus simples avec Excel. A la fin de mon stage à l'INRED j'étais spécialisé en vision par ordinateur et en traitement de l'image et j'ai rencontré un chef d'entreprise, Jean Meunière, qui voulait un système permettant de détecter les noyés dans les piscines en utilisant des caméras : ce problème me paraissait plus difficile que le traitement des images de trafic automobile, mais il me semblait plutôt sympathique et la demande venait d'une entreprise dont le but était de vendre un produit. J'ai accepté cette offre, l'entreprise vendait, mais le produit était loin d'être parfait et on a beaucoup travaillé à le rendre fiable, je ne veux pas m'arrêter sur la société, ni sur les mathématiques et le traitement de l'image, mais dire, simplement, que dans le traitement de l'image il y a toutes les mathématiques qu'on retrouve d'une manière ou d'une autre.

Je voudrais apporter un point de vue plus personnel sur les caractéristiques des profils des candidats à l'embauche. Premier point, il semble qu'il y ait une distinction entre les profils mathématiques appliquées et scientifiques, par exemple une des caractéristiques qui différencie les mathématiques appliquées et les sciences en général est l'apprentissage et l'utilisation de la démonstration ; cette démarche conduit à des certitudes. Lorsque je disposais d'une équation fondamentale, j'étais certain de posséder la vraie équation parce que j'avais démontré que c'était l'équation fondamentale, alors que les hypothèses étaient peut-être douteuses. Dans les autres sciences, l'attitude est différente : aucun physicien ne peut se vanter d'être sûr de ce qu'il a fait et il développe un sentiment d'humilité face à ses résultats. Les problèmes importants et difficiles se posent au niveau de la modélisation : dans l'industrie on passe beaucoup de temps à modéliser et à y revenir plutôt qu'à résoudre le problème et en fait résoudre un problème revient souvent à un changement de modèle. On dit fréquemment qu'un bon chercheur est celui qui se pose les bonnes questions, un bon industriel est peut-être celui qui est capable de changer souvent de questions s'il voit qu'il n'arrive pas à ce qu'il souhaite. Faire ce type de remarque ne s'apprend pas à l'université.

Second point, une tendance qui se dégage dans les contacts avec les universitaires avec qui je travaille, est qu'en recherche on apprend à s'appuyer sur les acquis pour traiter les problèmes, ce n'est pas la démarche des industriels qui, s'ils s'appuient sur leurs acquis, resteront performants pendant les cinq prochaines années mais qui après deviendront mauvais ! Si par exemple on avait pu détecter les noyés dans le marc de café on serait devenu des spécialistes du marc de café et pas du traitement de l'image ! Or à l'embauche, un titulaire du DEA sait appliquer ce qu'on lui a appris, ce qui est bien, mais au bout de deux ou trois ans il doit changer. Ceci amène aux problèmes de la diversité des formations tech-

niques : ce qui se fait dans les écoles d'ingénieurs où on enseigne, non pas un panel de techniques, mais on leur enseigne la meilleure façon d'aller chercher la solution à leurs problèmes, c'est-à-dire où trouver le livre contenant la solution de leurs problèmes. Or dans les DEA, au moins dans ceux que je connais, on présente un certain nombre de problèmes et leurs meilleures solutions connues, mais une telle démarche est beaucoup trop ciblée pour les besoins des industriels. Enfin, les compétences techniques ne sont pas les seules qualités requises et des compétences humaines sont aussi importantes : il faut bien entendu être sympathique, mais il faut être capable de communiquer, savoir exposer correctement un problème, parler correctement, connaître ses limites. Dans les écoles d'ingénieurs l'apprentissage de ces qualités fait partie de la formation mais on ne le trouve pas encore dans les enseignements universitaires.

Pour conclure, la société dans laquelle je travaille fait beaucoup de mathématiques : des chercheurs extérieurs viennent dans l'entreprise. Les mathématiques sont souvent nécessaires mais pas suffisantes, pour moi elles sont un outil. Le pianiste doit faire des gammes pour bien jouer, on doit faire des mathématiques pour bien travailler dans l'industrie, mais elles permettent aujourd'hui d'inventer à l'université, mais pas nécessairement d'innover dans l'industrie dans la mesure où il existe un énorme décalage entre le monde universitaire et la sphère industrielle.

G.P. : La parole est à Benoît Rottembourg.

Benoît Rottembourg : Je suis à la tête d'une petite équipe qui appartient à la holding de Bouygues ; on peut considérer que l'existence de cette équipe correspond à de la recherche externalisée, car la holding n'a pas besoin de recherche et développement, nous travaillons pour les métiers de Bouygues : TF1, Bouygues télécom, COLAS qui est la filière routière de la holding, Bouygues construction et enfin Bouygues immobilier et le SORE pour l'eau. J'essayerai de répondre à la question sur l'externalisation de la Recherche et Développement, cela ne me pose aucun problème métaphysique. Je travaille aussi pour d'autres entreprises. Je vous donnerai trois applications, sans vous expliquer les modèles mathématiques, pour illustrer le type d'interventions que l'on traite.

Lorsque j'ai été invité à cette table ronde, j'ai décidé de choisir les trois premières applications qui se présenteraient. Voici donc les trois exemples. Le premier se présente de la manière suivante : dans un comté situé à l'est de Birmingham on a 1300 km de routes ; la question posée à COLAS était : "Combien faut-il de camions pour saler les 1300 km de routes en 3 heures à partir de 7 dépôts ?" Je vous laisse y réfléchir pour la suite. La deuxième question date de deux semaines ; France-Télévision, que je ne regarde pas beaucoup, mais cela m'a donné l'occasion de le faire, se pose des problèmes suivants sur les spots de télévision : lorsque qu'un client achète un espace publicitaire il précise ses exigences trois mois à l'avance, sous la forme : "Je veux le 20h40 et une durée de 12 secondes ou 30 secondes". Vous avez tous en tête le spot Ovomaltine qui durait 8 secondes ; typiquement les durées s'échelonnent entre 8 et 40 secondes. Le prix à la seconde varie : un spot de 30 secondes ne coûte pas trois fois plus cher qu'un spot de 10 secondes ! Cette année France2 a annoncé qu'elle allait baisser les prix pour les spots d'une

durée correspondant à des multiples de 5 secondes- de 5 à 30- l'idée étant purement combinatoire : plus j'ai de choses avec des 5 et des zéros, meilleur est l'emboîtement d'une durée de 2 minutes. La question posée par TF1 est la suivante : "France2 décide cela, pourquoi ne le faisons-nous pas ? Qu'est-ce que cela nous coûterait de le faire ? Faut-il le faire ?" Troisième question : une DRH fait des séminaires pour managers et pour intégrer les jeunes collaborateurs à l'entreprise, elle m'a posé la question suivante : "Un séminaire dure trois jours, j'ai 18 participants divisés en 4 groupes, je souhaiterais que chaque participant rencontre le maximum de personnes, qu'un manager ne rencontre personne de son propre métier et de sa propre filiale et je souhaiterais aussi qu'à chaque table il y ait au moins 4 filiales représentées." J'ai délibérément fait ce choix pour vous montrer que les enjeux sont divers. La première question à un enjeu de un million d'euros- on économise quelques camions, on ferme un dépôt. Dans le marketing l'enjeu peut être très émotionnel : les comtés d'Angleterre sont très préoccupés par les enjeux liés au salage des routes, ce qui mobilise quelques millions de livres sterling par an et on doit procéder à des appels d'offres. La deuxième question est une question à quelques dizaines de millions d'euros et la troisième question est là pour économiser un peu de temps de travail de la DRH est à peu près à mille euros. Voilà ce qui arrive régulièrement sur nos bureaux et je voudrais vous dire ce que sont les mathématiques qui se cachent derrière ces questions : un peu d'analyse convexe- modélisation, relaxation- des statistiques, notamment dans la deuxième question il faut prévoir ce qui peut se passer au niveau des gains ou des pertes -, optimisation combinatoire - plus courts chemins dans les graphes, plus courts chemins sous contraintes, programmation dynamique à la Bellman, optimisation stochastique car de grandes firmes, comme par exemple l'Oréal, peuvent annuler brutalement des campagnes publicitaires et il faudra tenir compte de ces annulations pour maintenir la qualité du service aux clients.

Maintenant en quoi un mathématicien se singularise-t-il ? Il n'a pas forcément à se définir comme tel lors d'une embauche car il a d'autres raisons d'exister - il fait du sport, il sait communiquer - mais il ne doit pas avoir honte d'être mathématicien et il n'est pas obligé de ne parler que de mathématiques. Ce que je vois apparaître et qui permet de nous reconnaître dans l'entreprise, c'est tout d'abord la rigueur qui permet de faire attention au problème posé, de ne pas dévier du problème posé, de le renseigner suffisamment. A ce point la partie modélisation est prédominante : on passe notre temps à correctement modéliser. Je donne un exemple : Pour Bouygues-télécom, nous planifions les 2500 conseillers-clientèle, cette filiale concerne 6 millions de clients qui possèdent un téléphone Bouygues-télécom. Ces 2500 conseillers doivent répondre chaque jour à 70.000 appels et l'une des questions posées était : "Je voudrais que toute personne qui arrive avant une autre mange plus tôt à la cantine" et il fallait que l'outil implémente cette contrainte, nous avons formulé le problème de trois façons différentes et nous avons abouti à la conclusion qu'il fallait qu'une personne ne mange pas trois ou quatre heures plus tard après son arrivée ce qui permettait de passer de contraintes quadratiques à des contraintes linéaires. Ce petit exemple montre qu'il faut porter une grande attention à la question posée. Dans la rigueur, je vois

la rigueur du processus expérimental : pour répondre au problème TF1-France2 il faut construire un simulateur valide qui pourra dire si on peut gagner ou perdre de l'ordre de un ou deux pour cent du revenu si je fais ce choix par rapport à tel autre. La dernière chose qui n'est pas toujours présente en sortie de thèse est l'absence de "religion", on n'a pas à ressortir tout ce que l'on connaît : son recuit simulé, son algorithme génétique, ... on doit respecter le problème. On a peut-être des catalogues de solutions, mais l'approche "religieuse" d'abord passe très mal auprès du client, ce n'est pas grave car on peut la déguiser en marketing, mais à la fin elle viole le problème. La troisième caractéristique liée à la rigueur, c'est la prudence. En l'occurrence pour le premier problème, le salage des routes, il faut être prudent : il ne faut pas dire que la solution trouvée, correspondant à une route que l'on a dessinée, est sans risque, que l'on a bien pensé à tout ; le mathématicien peut dire : "Vous m'avez donné un modèle agrégé et imprécis et les résultats sont imprécis". Après la rigueur, la seconde qualité qui identifie le mathématicien est la culture dont on a déjà beaucoup parlé : le sens du modèle, des catalogues de problématiques, ce qui est fréquent en recherche opérationnelle et ces catalogues existent, enfin un panel de méthodes ce qui est l'opposé de la "religion". D'autres qualités que l'on reconnaît au mathématicien sont : une certaine ténacité, une originalité, c'est peut-être un de nos côtés ludiques, mais on peut avoir une originalité dans l'approche des problèmes et ceci peut servir de positionnement commercial ; on apparaît dans les appels d'offres par une approche un peu différente. Enfin et c'est dominant dans les qualités, c'est la pédagogie, c'est-à-dire être simple, clair et répétitif : on éduque nos clients, on ne fait pas seulement de la vente, on veut qu'ils réfléchissent et qu'ils fassent appel à nous la prochaine fois. Je le répète, c'est dominant ; cela m'a étonné, je pensais être débarrassé des élèves, c'est pire mais c'est un des charmes du travail. En particulier, la partie prendre son temps et étudier est fondamentale. Quand vous faites des statistiques, par exemple pour estimer correctement le temps d'attente au téléphone, il faut avoir un bon protocole pour une bonne fiabilité de cette estimation, mais on peut s'y intéresser indépendamment de la question posée, et penser que c'est une information importante que l'on va pouvoir utiliser dans d'autres situations. On a aussi, sans doute, les défauts de nos qualités, nous mathématiciens appliqués avons beaucoup de handicaps dans l'entreprise : le premier est le préjugé, il est terrible et cinq ans après mon arrivée dans l'entreprise je suis encore victime de ce préjugé : l'autisme, le mathématicien est un "barbu", un "moustachu". J'ai aussi entendu la remarque suivante : "Deux mathématiciens dans un bocal trouveront toujours à s'occuper". Il peut se produire que l'on rencontre des réactions du type : "Il était en prépa avec moi, il était bon en mathématiques, j'étais mauvais et il est jaloux !". Le préjugé ne dépend pas de nous, mais il faut savoir qu'il existe quand on se présente à une embauche. A l'opposé de la rigueur on trouve la rigidité, c'est une déformation que l'on a parfois et aux plus jeunes qui arrivent dans l'entreprise je dois leur dire d'être mieux à l'écoute du problème de départ et de ne pas s'arrêter sur quelque chose qui semble satisfaisant et faire de la "surqualité", par exemple optimiser à 1% , alors que l'imprécision des données ne permet pas de l'obtenir, ceci est lié au plaisir de raffiner à 1% ! Avec la rigidité va la len-

teur : il est vrai que le problème du salage des routes devait être traité en 15 jours, celui de TF1 en une journée ; les questions intéressantes sont celles qui se posent à chaud, c'est-à-dire qu'elles empêchent de dormir ceux qui vous posent ces questions ; c'est dans ces moments qu'il faut tenir votre client à la jugulaire, sinon ce n'est pas intéressant, ce n'est pas stratégique et vous êtes un mathématicien dans son bocal ! Un dernier point que je relève chez certains jeunes c'est une avare intellectuelle qui consiste à penser : "J'ai fait ma thèse je vais amortir : j'ai fait des EDP, donc je vais les appliquer, les valoriser". Eh bien non, même un mathématicien doit sortir de sa zone de confort s'il veut être écouté.

Je termine sur mon cursus personnel : Un bac en 1983, mathsup, mathspé, puis une école en informatique, un DEA de systèmes informatiques, une thèse en optimisation de systèmes de grandes tailles, puis- et là c'est l'erreur !- cinq ans d'enseignement à l'ENSTA, enfin Bouygues depuis cinq ans et de nouvelles études cette année - j'ai raté l'habilitation ! Les jeunes, en moyenne, dans mon équipe ont une thèse pour 70% d'entre eux, 50% ont un diplôme d'ingénieur, deux collaborateurs viennent de l'Ecole normale, l'un de l'Ecole polytechnique, un autre est titulaire d'un DESS plus une thèse de l'institut de mathématiques d'Angers. Je vais terminer avec un peu de sport ! ...

G.P. : Nous avons pris du retard et je vais demander à Olivier Pironneau d'aborder rapidement le thème : Former des mathématiciens pour l'entreprise et les services. Il intervient en tant Directeur d'un DEA d'analyse numérique et ancien Directeur du Laboratoire Jacques-Louis Lions.

Olivier Pironneau : J'avais prévu de vous montrer quelques images mais nous allons manquer de temps et je vais vous parler de ce que je connais : l'analyse numérique, et plus particulièrement celle qui est liée aux EDP. Comme professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, j'ai la chance d'être dans un domaine où les applications sont multiples et a priori on n'a pas de problèmes dans nos relations avec les industriels ; ceci dit c'est un peu la théorie car la science des EDP va de considérations très théoriques, difficiles à vendre aux industriels, aux applications numériques, mais on a nous-mêmes à l'intérieur de notre formation une tendance au "trop théorique". Je suis dans un domaine où l'informatique tient une place importante et je me suis spécialisé dans un cadre où on utilise le C++, le calcul parallèle, etc. et je n'ai aucun problème de ce côté.

Je voudrais simplement poser quelques jalons pour le débat futur en évoquant un premier problème : celui de l'équilibre entre la théorie et la pratique et à ce propos je vais vous présenter quelques problèmes concrets. Il s'agit de calculs, de dessins qui sont tirés de thèses effectuées par des étudiants ayant séjournés au laboratoire. Sans entrer dans les détails, vous voyez que l'on travaille sur les méthodes numériques, les contrôles d'erreurs, les méthodes asymptotiques à petits paramètres, sur des problèmes d'identification de paramètres, etc. Pour former des spécialistes on a une maîtrise d'ingénierie, un DEA et un DESS ; la maîtrise d'ingénierie a une particularité : elle nous permet de débusquer les talents en informatique et j'aimerais discuter de la formation en informatique des étudiants d'université dans la filière mathématique ; un étudiant bon en informati-

que ira en informatique et nous récupérons des étudiants bons en mathématiques qui ont des dons en informatique : ces étudiants on ne les trouve pas, en général, dans les écoles d'ingénieurs. A l'université j'ai personnellement réussi à récupérer des étudiants de talent en maîtrise, étudiants bons en mathématiques et avec des dons en informatique et ils ont très bien réussi dans leur vie professionnelle. Un deuxième point que je voudrais soulever est que, lorsqu'on est universitaire, on n'est pas obsédé par les débouchés industriels dans la mesure où ils correspondent à un tiers des possibilités, un tiers correspond au renouvellement dans l'enseignement pour perpétuer le système et la survie des grands organismes, -CEA, ONERA, EDF, etc.- où la problématique n'est pas la même que celle évoquée par le précédent intervenant, dans ces organismes les personnels recrutés utilisent essentiellement leur spécialité. Il n'existe pas de spécialisation en thèse ou même en thèse CIFRE. Il existe toujours des applications nouvelles, en voici deux : on traite de plus en plus de problèmes liés à l'environnement, de nouveaux acteurs apparaissent comme l'ANDRA, un petit film vous montrera que l'on va aussi intéresser le cinéma. Parmi les nouveaux acteurs on peut citer l'architecture, la finance, les mathématiques avec applications médicales. Dans un débat sur les applications il faut se rappeler que ce ne sont pas nécessairement les grandes industries technologiques qui sont sur le devant de la scène, mais il faut tout de même ajouter que le nombre de postes proposés par ces nouvelles applications est assez faible. J'ai mis en avant quelques points importants dans la formation : un équilibre à trouver entre partie théorique et partie appliquée, cet équilibre existe aussi chez nos partenaires entre recherches et applications industrielles ; il existe un problème lié aux conversions thématiques et qui, à mon avis, est une voie d'avenir pour nous. Je rencontre à l'étranger de plus en plus de laboratoires dont les directeurs acceptent que les jeunes chercheurs fassent leurs recherches dans des domaines qu'ils choisissent mais ils leur demandent de faire des cours dans des modules appliqués, par exemple sur les méthodes statistiques en bio-technologie, domaines complètement en dehors des intérêts typiques du chercheur, qui a priori, comme il est fonctionnaire refuse. Il me semble que, maintenant il faudrait accepter, car les EDP ne suffisent plus dans nos rapports avec la vie industrielle ; les constantes de temps du changement dans les universités étant plus longues que dans l'industrie, ce qui est à la fois un avantage et un inconvénient. En cas de crise dans l'industrie l'université sert de tampon jusqu'à Bac+8 par exemple, mais c'est aussi un inconvénient.

Gilles Pagès : Je voudrais évoquer une autre facette des mathématiques appliquées qui concernent plutôt les probabilités, les statistiques à travers l'exemple du DEA de la filière "Probabilités et finances" du DEA de probabilités et applications de l'Université Pierre et Marie Curie. C'est une histoire assez instructive à certains égards puisqu'au début des années soixante-dix s'est ouvert à Chicago le marché des options négociables, en 1973 pour être précis. De façon tout à fait inattendue, l'un des domaines que l'on considérait comme le moins appliqué des mathématiques, en général, et des probabilités en particulier, le calcul stochastique - c'était le domaine le plus invraisemblable (obscène !) puisque

L'on manipulait des fonctions nulle part différentiables, des processus stochastiques particulièrement désagréables pour des non-spécialistes - s'est révélé être la pierre angulaire d'une formule mystérieuse : la formule de Black et Sholes. Cette formule avait la particularité d'être essentiellement mathématique : elle reposait sur des calculs probabilistes et des EDP et on pouvait choisir l'une des deux méthodes qui, dans un premier temps au moins, excluaient de manière assez inattendue toute forme de statistiques. Donc très rapidement les Français s'y sont intéressés, car c'était un domaine où on trouve des probabilités et pas de statistiques - c'est un peu les qualités de nos défauts ou les défauts de nos qualités. En particulier notre laboratoire de probabilités, qui avait quelques compétences reconnues en calcul stochastique en France et ailleurs, a été soumis au fil des années, notamment par l'intermédiaire de Nicole El-Karoui qui s'est intéressée très rapidement aux mathématiques financières, à un flot de questions à caractère technique venant des banques lesquelles demandaient des étudiants intéressés par une intégration dans des sites de recherches. D'année en année la pression s'est faite de plus en plus forte et pensant la faire disparaître Jean Jaccod, alors directeur du DEA de probabilités, et Nicole El-Karoui ont créé une filière probabilités et finances dans le cadre du DEA. Marc Yor est ensuite venu prêter main forte à ce tandem, puis longtemps après je suis venu rejoindre cette équipe dans laquelle je travaille depuis un an ou deux. Comme vous pouvez le noter la demande existe ; en 1991 on avait 5 diplômés et cette année on arrive à 60, 70 qui bon an mal an trouvent tous du travail sans trop de difficultés. C'est une filière de DEA qui a 80%, 90% fournit des spécialistes à vocation "professionnalisante", spécialistes qui se placent en dehors du système universitaire et qui ne passent pas de thèses. Ce type de formation ressemble assez à un DESS : pendant 6 mois on fait des mathématiques et on suit des séminaires pour se familiariser avec le monde de la banque et des finances de marchés puis, pendant 6 mois, on fait un stage en entreprise. On a un profil d'étudiants un peu particulier, c'est ainsi que 40% d'une promotion se composent d'étudiants titulaires d'un diplôme d'écoles d'ingénieurs, un quart vient d'une maîtrise de mathématiques, 15% sont des étudiants étrangers enfin 5 à 10% d'étudiants viennent d'écoles de commerce. On voit là qu'il existe une difficulté qui, je l'espère (!), sera la difficulté de nombreuses formations dans les années à venir, c'est la diversité des formations à l'arrivée dans le DEA : des élèves des écoles d'ingénieurs souvent brillants mais qui n'ont pas fait forcément autant de mathématiques que les étudiants d'université, des étudiants qui viennent des maîtrises de mathématiques - qui ont le sentiment d'être moins brillants, sentiment pas toujours exact, - qui eux n'ont fait que des mathématiques pendant deux ans et dont le niveau en mathématiques est plus élevé que celui des élèves des écoles d'ingénieurs. Les étudiants étrangers permettent aux enseignants de s'apercevoir que l'idée de jouer sa vie sur une épreuve de trois heures, notée sur 20 à l'écrit, qui se répète à raison de deux par jour pendant trois jours, idée qui est très populaire en France, mais idée qui, pour un étudiant italien, est une aberration et qui, pour un étudiant d'un pays de l'Est, est complètement incompréhensible, car dans le système éducatif de nombreux pays, à partir d'un certain niveau, les examens sont essentiellement des examens oraux.

Il faut aussi que nous arrivions à prendre en compte et à évaluer des étudiants qui ont été évalués dans un système différent du nôtre. Evidemment, lorsque que l'on évoque ces méthodes en présence de polytechniciens qui sont champions du monde, surtout en France, de la résolution de problèmes en temps limité, ceci peut entraîner éventuellement quelques difficultés, mais c'est à nous de les gérer. Historiquement, ceci peut faire la spécificité du DEA : ce que nous avons et que d'autres n'avaient pas au départ c'était le calcul stochastique ceci nous a permis de démarrer un DEA sur les chapeaux de roues mais très rapidement on s'est aperçu que ce n'était pas suffisant et aux étudiants ayant une formation scientifique on devait apporter une introduction aux marchés financiers et, ce qui a déjà été souligné par de nombreux intervenants, il fallait donner une formation dans un domaine absolument crucial, celui de la modélisation. C'est-à-dire connaître la formule d'Ito, le mouvement brownien, les équations différentielles stochastiques, la formule du temps d'arrêt et j'en passe, comme les processus de Lévy ; tout ceci est très bien mais si on n'est pas capable de modéliser une gestion de portefeuilles, par exemple, toutes les connaissances théoriques ne servent pas à grand-chose. La modélisation est une activité difficile dans le sens où ce n'est pas que des mathématiques et elle demande des qualités un peu différentes mais assez peu développées dans l'enseignement français en amont. Contrairement à ce que l'on peut croire, la formule d'Ito à appliquer, celle qui s'enseigne à peu près dans toutes les écoles de commerce, peut s'appliquer mécaniquement assez rapidement, mais modéliser un problème en finance comme ailleurs est véritablement un problème difficile. Un troisième point concerne la programmation de tableurs, en C++ par exemple, il faut savoir intervenir sur le système et à l'échelle de ce qui sera demandé plus tard dans une cellule de recherches. Il faut aussi savoir utiliser des logiciels qu'on n'a pas écrits, des programmes qui ne sont pas complètement élaborés et dont le développement se poursuivra après, etc. Deux autres choses sont apparues très vite : passés les premiers instants de joie et d'euphorie, il fallait faire appel à toutes la gamme des mathématiques, notamment à l'analyse numérique des EDP : méthodes des différences finies, méthodes des éléments finis et d'autres méthodes de plus en plus sophistiquées. Il fallait aussi prendre en compte l'émergence importante des probabilités numériques : méthodes de Monte Carlo, simulation. On l'a déjà souligné, mais c'est important, l'informatique avançant beaucoup plus vite que la recherche en mathématiques, il y a de plus en plus de problèmes que l'on peut résoudre plus rapidement par la simulation que de façon analytique ou par des méthodes qualitatives. Tout ceci doit être pondéré, mais disons que la simulation doit être un élément essentiel de la formation. Sans rentrer dans les détails techniques soulignons que la formule de Black et Sholes se caractérise par le fait que la volatilité et les taux d'intérêt sont constants ; cette formule est un peu bizarre mais elle a permis à l'un des deux auteurs d'avoir un prix Nobel d'économie pour l'avoir établie, l'autre est mort avant, mais tous les deux se trouvent honorés . Il s'agit d'applications qui, en apparence, paraissent un peu compliquées, mais je voudrais rappeler que l'absence de statistiques nous place face à un problème dans lequel on veut donner un prix à un flux financier positif : à une date T vous devez recevoir un certain flux fi-

nancier, peu importe lequel, et la personne qui vous le garantit, comme ce flux est toujours positif, ne va le faire qu'en échange d'une contre partie, c'est-à-dire contre une certaine prime qui va être grosso modo la moyenne de ce qu'elle aura à verser à cet instant. Comme les modèles mis sur les actifs ne sont pas vraiment exacts et ne peuvent pas l'être parce que la finance est, par définition, une activité strictement humaine qui n'a pas de réalité physique sous jacente et permanente, les modèles changent constamment, plus exactement les modèles que l'on met sur les problèmes changent tout le temps, c'est une des raisons pour lesquelles les statistiques ne sont pas aussi prégnantes qu'on pourrait le croire dans ce monde. Le modèle le plus simple, celui qui est reflété par la formule de Black et Sholes, dépend de deux paramètres, peu importe lesquels, l'un que l'on suppose connu et l'autre est la volatilité, l'écart type du rendement instantané d'un cours d'actions par exemple, et ce paramètre est inconnu, mais pas complètement puisqu'on peut s'appuyer sur des historiques et en faire des statistiques. Mais comme les modèles ne sont pas fiables, il s'avère qu'il n'est pas très intéressant de faire des statistiques là-dessus dans un premier temps ; au lieu de cela on résout un problème inverse c'est-à-dire qu'on analyse les primes qui sont données sur le marché, que le marché cote. A quoi bon calculer avec des mathématiques des données fournies par le marché ? A quoi bon ? Si, parce que précisément on résout le problème de prime dans le modèle auquel on s'intéresse, Black et Sholes, en fonction des différents paramètres, dont cette volatilité mystérieuse que l'on cale sur le marché : ceci est un des fondements de la démarche actuelle en finances. Il s'agit des problèmes de calibration ou de calage, réduits ici à l'état le plus élémentaire qui soit et qui consiste à récupérer un paramètre en faisant de l'adéquation sur les prix de marché. Il est amusant d'observer que, dans ces cas, la volatilité qu'on avait supposée constante dans le modèle devient une fonction des autres paramètres du modèle, donc ce dernier est faux, pourtant tout le monde l'utilise ! C'est la problématique fondamentale que l'on peut trouver ridicule en un certain sens, mais elle fonctionne assez bien car on augmente le nombre de degrés de liberté et on cale de plus en plus de paramètres. Augmenter le nombre de degrés de liberté c'est adopter des modèles de plus en plus compliqués et contrairement aux apparences on a besoin de plus en plus de mathématiques parce qu'on va rendre la volatilité stochastique, on va rajouter des sauts aux actifs et on va faire un certain nombre d'opérations qui permettent de caler les paramètres de manière efficace. Pourquoi fait-on cela ? Je n'entrerai pas dans les détails mais je soulignerai que l'on arrive alors dans des problèmes de couverture qui sont importants mais qui sont fondés sur le calcul de cette volatilité, c'est pour cela qu'on a besoin de mathématiques. L'évolution des marchés qu'il faut accompagner, c'est la condition sine qua non pour que les choses fonctionnent d'un point de vue pédagogique. Dans les années 80 le calcul stochastique a régné en maître à travers l'explosion du marché des options de plus en plus exotiques qui demandaient des capacités en calcul stochastique et en calcul de lois de probabilités de plus en plus sophistiquées. Il y a eu de plus en plus de sous-jacents qui ont donné naissance à des produits dérivés des taux d'intérêt. Dans les années 90, suite à 87 et à la quasi-faillite des TCM, ce qui revient au devant de la scène et qui sont des problèmes

beaucoup plus universels que la finance de marché, ce sont les problèmes de gestion du risque. Il s'introduit ici la notion de "valuatrice" qui est une notion nouvelle conduisant à calculer un intervalle de confiance pour la valeur à huit jours d'un portefeuille en fonction de sa valeur aujourd'hui. On veut qu'elle ne sorte pas d'un certain intervalle et ceci induit immédiatement, non seulement de plus en plus de mathématiques mais des nouvelles mathématiques ou plutôt on fait rentrer dans le champ des mathématiques appliquées, notamment l'économétrie, les statistiques, la théorie des valeurs extrêmes, l'optimisation de portefeuilles ce qui entraîne le développement massif de toutes les techniques d'optimisation et d'autres problèmes très intéressants. C'est là que la formation rejoint la recherche car on doit s'attaquer à des problèmes non-linéaires de grandes dimensions ce qui représente des situations les plus difficiles en mathématiques appliquées : on a besoin de résolutions grossières, mais néanmoins en assez grandes dimensions et c'est un problème qui est intéressant à tous les niveaux.

Je conclurai en disant que ce qui me semble important dans les contacts avec les milieux financiers c'est leur spécificité qui leur fait dire qu'en finance il n'y a pas de problèmes il n'y a que des solutions. C'est-à-dire que lorsqu'un problème est posé il faut qu'il ait une solution, on ne peut pas faire autrement. Une telle attitude a beaucoup d'avantages car, contrairement à l'habitude qu'on peut avoir dans une culture d'ingénieur, les opérateurs du monde de la finance sont ouverts à toutes les innovations et prêts un peu à tout pour que ça marche ! On voit aussi les effets pervers de cette attitude, car s'intéresser à tout, c'est aussi s'intéresser à rien ! Il y a donc une grande volatilité dans la façon dont on aborde un modèle, la réactivité peut être telle qu'à partir d'un certain moment plus personne ne peut suivre. Cette ouverture, cette curiosité intellectuelle peut être stimulante pour les différents intervenants et aussi pour les milieux de la finance car les sciences y ont fait une irruption un peu plus tardive ce qui donne à ces milieux cette plus grande ouverture aux deux sexes, donc aux femmes, que celle des milieux industriels plus traditionalistes. Il existe de nombreuses échelles dans la problématique de recrutement et de formation : il faudrait comprendre les raisons de la désaffection des jeunes pour les sciences, notamment des jeunes filles. Je ne peux pas répondre à cette question, mais il est clair que, dans le monde de la finance, on approche de la parité et c'est un monde qui est beaucoup plus féminin et plus intéressant pour les femmes- et les hommes !- que d'autres domaines en mathématiques appliquées.

M. T. : Des questions sur ces dernières interventions ? Comme nous avons pris du retard nous renvoyons les interventions à la seconde table ronde.



FIG. 1 – Table ronde “Les métiers des Math.”, 18 septembre 2003

Table ronde

Le rôle des mathématiques dans l'industrie et les services

animée par **Marie-Odile Monchicourt**

Transcription de **Gérard Tronel**

Marie-Odile Monchicourt : Nous sommes entourés d'acteurs importants de l'industrie, des services et des organismes civils. Je dois vous dire que je suis assez impressionnée ; nous allons essayer avec eux de voir comment les mathématiques interviennent dans l'évolution de l'industrie et surtout les besoins qui se font sentir en mathématiques aujourd'hui pour évoluer, pour être plus performant. Nous tenons beaucoup, autour de cette table, à vos interventions, donc il faut que la parole soit facile entre vous et nous. Les intervenants vont s'exprimer cinq minutes tout au plus, ils me l'ont promis, puis des réactions immédiates si vous le souhaitez.

Je voudrais demander tout d'abord à Monsieur Bruno Stoufflet, directeur de la prospective et de la stratégie scientifiques chez Dassault-Aviation : "Comment les mathématiques interviennent aujourd'hui dans son travail quotidien et ensuite quels sont les besoins qu'il ressent".

Bruno Stoufflet : Je vais essayer, en cinq minutes, de vous donner des idées sur les domaines dans lesquels les mathématiques ont une place importante, prépondérante. En premier, il y a tout le monde de la modélisation physique, je vais y revenir dans la suite, puis je donnerai quelques idées des défis qui se présentent dans le domaine de l'automatique, du contrôle puisque ce que l'on est amené à mettre en l'air, vous les connaissez, les avions, ont besoin d'être contrôlés. En troisième lieu je vous parlerai d'un domaine qui est peut-être moins connu, c'est tout ce qui est lié à la conception des systèmes embarqués où on a de plus en plus besoin de mathématiques appliquées et d'algorithmique.

Dans le domaine de la modélisation, ce que l'on peut dire aujourd'hui, en tout cas pour ce qui nous concerne c'est-à-dire la modélisation des performances d'un avion dans un milieu aérien, c'est qu'on est arrivé à un niveau de maturité très satisfaisant que ce soit dans le calcul des structures, l'aérodynamique et l'électromagnétisme. C'est quelque chose qu'on a pu juger, puisqu'on est actuellement en train de développer un nouvel avion qui est le Falcon 7X, futur produit assez pointu en matière d'aérodynamisme et de structures, puisque les structures sont souples et on a pu apprécier nos logiciels de simulation, notamment en aérodynamique et c'est un peu la récompense de 25 ans d'efforts. On a démarré il y a à peu près 25 ans le développement de logiciels fins de modélisation pour la résolution des systèmes d'EDP de la mécanique des fluides (Navier-Stokes) et on a eu des validations avec des essais en soufflerie qui représentent le vol, c'est-à-dire avec le bon nombre de Reynolds du vol, essais très satisfaisants, et on sait que

L'on a maintenant des outils qui permettent de faire de la conception et de prédire les performances de manière satisfaisante. On vit actuellement une transition et c'est sur ce point que je voudrais aborder les problèmes : on a développé tous ces logiciels en collaboration avec des équipes de recherches parce qu'on a eu la capacité d'extraire des modèles compliqués du type Navier-Stokes, c'est-à-dire des problèmes modèles : typiquement des équations d'advection, des équations de la chaleur, modèles pour lesquels les équipes de recherches ont pu développer des algorithmes et on a été capable de faire le transfert des propriétés trouvées à partir de modèles simples vers ceux que les ingénieurs manipulent et qui peuvent être parfois compliqués puisqu'on rajoute de la modélisation. Aujourd'hui on sent que l'on est un peu bloqué parce que ce que l'on manipule devient de plus en plus complexe : des modèles compliqués en aérodynamique sont des modèles qui vont prendre en compte la turbulence, en structures ce sont des modèles non-linéaires, en électromagnétisme on doit prendre en compte des propriétés diélectriques des matériaux et ici on est un peu coincé car on sait difficilement extraire des problèmes modèles. On doit trouver des liaisons avec les équipes de mathématiciens appliqués et construire de nouvelles relations, c'est un problème sur lequel il faut se pencher. Ceci est en plus compliqué parce que l'on a de plus en plus de couplages entre les disciplines ce qui rajoute des degrés dans la complexité ; là aussi trouver un problème modèle n'est pas simple. Arriver à exhiber des propriétés sur des problèmes modèles et les transposer aux modèles réels devient de plus en plus dur, il faut y réfléchir et pour cela on a besoin des mathématiciens. Les grands défis dans le monde de la modélisation conduisent à traiter de plus en plus des problèmes instationnaires dans lesquels la dimension du temps joue un rôle important, ce qui pose de gros problèmes sur les conditions aux limites à mettre dans la simulation, c'est également aller au-delà des méthodes d'éléments finis qui commencent à trouver leurs limites : quand on traite de problèmes de vibrations on s'aperçoit qu'il existe des plages de fréquences que l'on ne sait pas traiter par les méthodes d'éléments finis ou que l'on peut traiter très difficilement, il faut passer à d'autres représentations sans doute énergétiques avec de la statistique ; c'est un nouveau champ qui s'ouvre et pour lequel on a besoin d'avancer. Une autre orientation porte sur le lien entre des modélisations utilisant les EDP et les systèmes dynamiques et là on a le sentiment que l'on change de communauté scientifique : les systèmes dynamiques sont très étudiés par les mathématiciens purs mais assez peu par les mathématiciens appliqués et donc on doit trouver un pont entre les deux communautés ; c'est un sujet de réflexion sur lequel on pourra peut-être revenir. Encore une autre orientation est la capacité de décrire un système multi-échelles et de trouver la cohérence entre les échelles. On pourra revenir sur tous ces aspects et, comme je l'ai souligné précédemment, sur les caractères multidisciplinaires, sur les couplages de représentations entre différents domaines.

J'ai déjà brossé le tableau des grands défis de la modélisation dans lesquels on trouve un mélange de physique et de mathématiques appliquées. Le deuxième domaine dans lequel les mathématiques ont joué un grand rôle est l'automatique qui, pour nous, est la capacité à définir les lois de contrôle des systèmes de pi-

lotage de l'avion : là nous sommes en train de chercher de nouveaux moyens qui ne passent plus simplement par des gouvernes mécaniques mais par des gouvernes fluides ou des gouvernes un peu plus astucieuses ; ceci va demander des efforts de modélisation plus fine de la physique. Aujourd'hui les automaticiens travaillent sur des représentations simples des systèmes, les plus simples possibles, linéaires ou non-linéaires mais simples, il est vraisemblable que cette approche aura ses limites quand on voudra définir de nouveaux moyens de contrôle. L'autre voie de recherches, dans ce monde de l'automatique, c'est la capacité à définir des lois de contrôle beaucoup plus automatiques que celles qu'on utilise actuellement : à savoir générer des lois de contrôle qui ont certaines caractéristiques sans procéder par approximations.

Le troisième domaine, peut-être moins connu ici, est tout ce qui concerne les logiciels embarqués, domaine qui affecte la sécurité des avions où tout le problème est de savoir écrire un logiciel sans faute, c'est une définition publicitaire du problème, mais cette opération demande la capacité d'avoir des approches "système" différentes avec différents critères : sûreté de fonctionnement, qualité de service, performances ; aujourd'hui on a énormément de mal à donner une cohérence à toutes ces représentations et à trouver les bons dimensionnements. Actuellement on est complètement démuni pour dimensionner un système pouvant a priori répondre à certains critères. Il existe là tout un champ d'ouvertures pour les mathématiciens, pour ceux qui peuvent modéliser ces types de systèmes, tout l'enjeu repose sur les capacités d'avoir des représentations formelles des systèmes, représentations qui permettent d'exhiber les propriétés de manière formelle avec du logiciel. Voilà assez rapidement brossé le tableau des domaines où les mathématiques vont jouer un rôle important et on pourra y revenir plus tard. Je vais terminer mon intervention en évoquant un besoin un peu plus transverse et à beaucoup plus long terme : c'est la capacité d'associer à une performance un intervalle de confiance. Aujourd'hui les ingénieurs manipulent des quantités déterministes et on ne sait pas bien quelle confiance on peut accorder à un résultat. On a ici un enjeu énorme car derrière cet intervalle de confiance se profile la notion de risque que l'on prend dans certaines situations : actuellement on n'est pas très avancé dans ce domaine et l'enjeu en matière scientifique est le lien entre la modélisation et une vision stochastique des problèmes. Ce domaine est abordé en ce moment mais pas de manière suffisante et satisfaisante ; il faut un pont entre mathématiques appliquées au sens classique, EDP par exemple et une vision stochastique des problèmes.

M.-O. M. : Autour de cette table quelqu'un voudrait réagir à ce que Monsieur Stoufflet vient de dire ? Dans la salle y a-t-il des questions ?

Question : Je voudrais savoir si votre entreprise embauche ?

B.S. : Des embauches de mathématiciens appliqués ? Oui. Des mathématiciennes aussi. Nous avons des étudiants en thèse de manière régulière, mais on n'embauche pas seulement nos thésards.

M.-O. M. : Cela veut dire que vous demandez que des mathématiciens fassent

de la recherche de manière à pouvoir répondre aux besoins qui sont les vôtres et qui sont très nombreux, comme on le soulignait. Ceci veut dire qu'il existe des ouvertures stimulantes pour un jeune thésard qui a envie de se lancer dans la recherche.

B. S. : Absolument. Depuis de nombreuses années si on embauche beaucoup d'ingénieurs qui sortent des écoles, on recrute un certain nombre de spécialistes, pas seulement en mathématiques, mais en physique, en chimie ou venant d'autres horizons. On a un certain ratio entre ingénieurs généralistes et spécialistes de domaines scientifiques, spécialistes qui, en général, sont titulaires de thèses et parfois d'un post-doc.

M.-O. M. : Vous avez signalé tout à l'heure que le logiciel embarqué était pour vous un besoin en terme de mathématiques et que vous vouliez un logiciel sans faute, mais ça n'existe pas !

B. S. : Non, mais il faut arriver à détecter les fautes aussi tôt que possible, c'est-à-dire avant de le réaliser en terme de spectre et avant de le mettre dans le produit. Aujourd'hui on passe par un grand nombre de tests coûteux et si on arrivait à éliminer une partie de ces tests, si on arrivait à exhiber des propriétés du logiciel assez en amont, ceci serait un gain appréciable d'autant plus que vous avez remarqué, dans l'aéronautique, la cellule d'un avion a tendance à durer une trentaine d'années, par contre tout ce qui est dans l'avion évolue constamment, que l'avion soit militaire ou civil. Une grosse partie des gains dans les coûts des produits vient de ce qui est embarqué, car on le modernise en permanence et puis il y a l'obsolescence de l'électronique qui oblige à refaire les logiciels.

M.-O. M. : Cela signifie-t-il que vous rencontrez des problèmes avec les logiciels embarqués ?

B.S. : Pour tout ce qui est logiciel critique, lié aux commandes de vol essentiellement, on n'a jamais eu d'accident sur le long terme car on a pour cela une méthodologie très coûteuse, mais qui n'a pas été remplacée : elle est mise en place avec de nombreux tests. Dans le domaine militaire, dans le système de missions, on a encore des problèmes de mise au point qu'on arrive à résoudre, mais ils sont coûteux et la méthodologie n'est pas suffisante car l'approche n'est pas assez scientifique, notamment en termes de dimensionnement et il existe là un vaste domaine de recherche. Des groupes de recherche, à l'INRIA par exemple, travaillent dans ce domaine, mais c'est encore insuffisant.

M.-O. M.. A la SNECMA fait-on aussi ce type de recherche ?

Christian Mari, Directeur de la Recherche et de la Technologie à la SNECMA : Oui, mais avant de répondre à votre question, je voudrais répondre à la question posée sur l'embauche : oui on embauche à la SNECMA. J'apporterai un complément : on aime bien considérer les mathématiques appliquées comme un outil que l'on maîtrise plus ou moins bien, mais comme un outil au service de la compréhension de la physique. On demande un peu une double compétence, physique approfondie ou pas, mathématique approfondie ou pas ; le potentio-

mètre peut être entre presque zéro et un suivant les cas ; mais les outils mathématiques au service de la compréhension de la physique constituent bien l'une de nos préoccupations.

Je dirai tout d'abord que je partage tout ce qu'a dit Bruno Stoufflet, en ajoutant quelques petits éléments : la SNECMA fabrique des moteurs d'avions, de fusées, d'hélicoptères, des trains d'atterrissage, des freins, etc. Nous fabriquons des choses légères puisque tout ce qui vole doit être léger, mais en plus doté de physique plus compliquée, car beaucoup d'éléments tournent et c'est très chaud, de 1000°C jusqu'à 2000°C parfois, ce qui représente un volant de température important ; le bruit doit être réduit au minimum parce qu'il est interdit de faire du bruit ! Il faut éviter les pollutions. On rajoute donc une complexité physique qui fait de notre métier l'un des plus intéressants. Ceci dit, pour parler du passé, je vais caricaturer et je vous prie de bien vouloir m'excuser, mais je me suis penché sur le médium, c'est-à-dire pas sur les mathématiques, mais sur l'ordinateur, parce que je pense que, sans l'ordinateur, ce que l'on fait aujourd'hui n'aurait pas été possible et on serait toujours en train d'intégrer des équations en ne les ayant pas discrétisées, on n'aurait pas eu les moyens de passer des équations à leurs discrétisations. L'ordinateur est passé de quelques centaines d'opérations par seconde il y a 50 ans à un pétaflop, soit 10 à la puissance 15 et ceci double chaque année. Une des questions est : Qu'a-t-on fait de cette puissance ? Il peut être très biblique de se demander ce que l'on a fait de la puissance que l'ordinateur nous a donnée ! On en a fait de très belles choses que je vais aussi caricaturer en trois axes : je partage ce qu'a dit Bruno Stoufflet, c'est-à-dire la complexité géométrique. On a fait du 1D, puis du 2D, du 3D, du 4D puisque on a maintenant des petits objets dans des pièces de un mètre, on a aussi ajouté le facteur temps, le transitoire, l'instantané et aussi la complexité multi-physique : on fait de l'aérodynamique et de la mécanique en même temps, ce qui fait deux complexités, mais je fais aussi de l'aéroélasticité, de l'aéroacoustique, mais l'acoustique fait vibrer les chambres de combustion : la combustion fait de l'acoustique et l'acoustique peut faire vibrer les chambres de combustion, les faire casser et provoquer des incendies, etc. Donc toute la physique va s'agréger et on veut prendre en compte les trois axes en même temps ; on est en train de s'y diriger. Comme l'ordinateur n'arrête pas d'accroître ses possibilités, on en rajoute et quand vous parlez à nos ingénieurs-cellules de modifier un rayon de un millimètre, ils reprennent l'ensemble de l'étude multi-physique, instantané et tridimensionnelle. Il me semble que là on est en train de gaspiller ce que le progrès technique nous a donné. Je dis "stop" et il faut revenir au fondamental. C'est bien entendu une caricature : les progrès dont a parlé Bruno vont continuer.

Je voudrais réorienter mon propos sur le fondamental d'un industriel : tout d'abord, comprendre comment ça marche, pour concevoir d'abord, fabriquer des objets et les vendre. Concevoir signifie que les produits doivent être légers et pas chers. Concevoir signifie optimiser en prenant en compte des contraintes contradictoires : les coûts ne vont jamais avec la masse, la température ne va jamais avec les coûts, etc. J'appelle cela l'optimisation ; vous connaissez sans doute mieux

que moi la discipline mais nous on balbutie; l'optimisation est le premier facteur que l'on va introduire demain dans nos recherches. Bien évidemment nous allons continuer le numérique traditionnel. Savoir, concevoir des choses et optimiser selon des contraintes toujours contradictoires. Les mathématiques que vous connaissez mieux que moi vont nous apporter beaucoup. Un deuxième élément d'optimisation est ce que l'on peut appeler la conception robuste; c'est faire un ensemble tel que, quelles que soient les causes qui l'oblige à bouger, la réponse, elle, ne bouge pas: son comportement doit être le plus "plat" possible et non le plus "pointu". Toutes les causes extérieures peuvent changer, l'ensemble, lui, continue à tourner comme prévu; à la limite il peut devenir moins pilotable. Dans ce domaine de la robustesse, des champs immenses s'ouvrent aux mathématiciens; ils peuvent nous aider à faire des constructions robustes. Par exemple les constructions doivent être robustes aux jeux mécaniques: quand un moteur vieillit les jeux s'agrandissent, les vibrations augmentent, les fuites peuvent elles aussi augmenter mais le moteur doit toujours fonctionner normalement. On revient au fondamental de l'industriel: savoir concevoir, c'est-à-dire toujours choisir entre des choses contradictoires, donc savoir optimiser et aussi savoir faire des constructions robustes pour que les systèmes fonctionnent, même en présence de chocs, même s'il y a du sable, même s'il y a des jeux. Ces deux champs d'investigation me semblent importants pour l'industriel. Pour résumer: oui au Navier-Stokes multidimensionnel, transitoire, multi-physique, à condition de ne le faire qu'à la fin du projet, et commencer par optimiser avant, peut-être en commençant par un modèle unidimensionnel, pas transitoire, pas stationnaire, peut-être pas multi-physique, mais bi-physique; c'est-à-dire avoir des outils d'optimisation adaptés à chaque moment du niveau de conception: on choisit d'abord les grandes options puis petit à petit on raffine. Aujourd'hui, on demande à un ingénieur de faire un calcul et il sort le gros rouleau compresseur tout de suite plutôt que de réfléchir à une optimisation initiale simplifiée. Voilà le débat: c'est une question ouverte dont je ne connais pas la réponse, mais ceci va nous occuper et nous permettre d'investir dans les années à venir.

M.-O. M. : Quelqu'un a-t-il des idées pour venir au secours de Christian Mari ?

Stéphane Cordier : Il faudrait peut-être que, dans vos services, les gens aient la fibre recherche et pas seulement la fibre "presse-bouton" !

C.M. : Vous prêchez un convaincu. Mais vous savez qu'en présence de l'ordinateur et dès que la place est disponible les gens font du "presse-bouton" ! Il m'est arrivé d'utiliser des restes de connaissances en thermique et aérodynamique, etc., de faire des petites équations de Bernoulli, de la chaleur, de poser des questions mais eux remettaient en marche leurs méthodes et ceci pour trouver des écarts de quelques degrés ! On peut souvent faire des calculs de tête, mais l'ordinateur permet de revenir aux "gros calculs". Il faut casser cette démarche; l'ordinateur nous a permis des choses grandioses et on est très satisfait, mais cet outil doit être maîtrisé et on doit aller vers les vrais problèmes: robustesse, optimisation. L'ingénieur doit choisir entre des situations qui sont contradictoires, sinon les problèmes seraient déjà résolus. Si vous pouvez nous aider, n'hésitez pas ! Je vou-

drais ajouter que nous sommes très accueillants aux mathématiciens ; nous avons lancé une initiative avec le CNRS pour les rencontrer, nous avons des contacts avec Monsieur Pironneau à ParisVI. Je dis aux mathématiciens qui veulent nous rencontrer : "Venez, nous avons des problèmes à vous proposer, problèmes qui peuvent vous conduire à une belle recherche".

Stéphane Cordier : En fait j'avais réagi au mot "ingénieur" ; ce que je voulais dire c'est qu'il faudrait embaucher plus de chercheurs, plus de docteurs, plus que des ingénieurs. C'était le sens de mon intervention.

C. M. : La réponse est : on embauche de manière indistincte ingénieur, chercheur, post-doc, ancien boursier CIFRE et autres, mais il se trouve aussi que dans les deux mondes et pour les candidatures on a plus de candidatures d'ingénieurs que de candidatures d'universitaires ou de chercheurs. Ce n'est pas une volonté délibérée, mais les ingénieurs constituent une plus grande quantité de candidats ; donc candidats des universités, chercheurs, venez !

Question : À la différence des intervenants qui vous ont précédé, vous avez l'air de dire que vous cherchez des mathématiciens pour les compétences qu'ils ont déjà ! Eventuellement d'engager un jeune docteur pour ce qu'il a fait en thèse.

C. M. : Oui, je confirme avec une nuance, c'est qu'on embauche des gens qui se plaisent dans notre entreprise et souvent ils y restent longtemps et pour une certaine partie importante de leur vie professionnelle, ils doivent pouvoir s'épanouir : celui qui veut s'épanouir, tout en raffinant son outil de travail, va s'épanouir en devenant de plus en plus expert ; d'autres, au bout de 5 à 10 ans d'une même activité, peuvent avoir envie de faire autre chose ; ils doivent s'épanouir en faisant autre chose ! Quand on recrute, on regarde à la fois la qualité d'être un expert dans un domaine et la qualité d'ouverture et d'adaptation à d'autres domaines puisque les deux cursus existent.

Question : C'est à la fois une remarque et une question concernant l'outil informatique. Pouvez-vous me dire quelle est, dans votre société, la part réservée aux logiciels commerciaux du style NASTRAN, PATRAN ou RADIOS et la part de logiciels développés en interne et adaptés très spécifiquement à vos problèmes qui ne peuvent pas être résolus par les logiciels du commerce ?

C.M. : On a commencé la modélisation, comme chez Dassault, voici une trentaine d'années et à cette époque il existait très peu de logiciels dans le commerce, mais quand ils sont apparus, surtout dans la mécanique, on les a utilisés. Dans le domaine de la mécanique des fluides, des Navier-Stokes très compliqués, le multi-physique, les logiciels n'existent pas, on les développe nous-mêmes. Ce n'est pas exactement nous-mêmes, mais c'est avec les chercheurs français qu'on va les développer : nous ne sommes pas des développeurs de codes, donc nous cherchons des partenariats avec des universités françaises, des écoles et avec tous ceux qui sont intéressés et qui ont les compétences. Ensuite les résultats sont injectés chez nous ; on coopère aussi avec le CEA, le CNRS, l'ONERA. Il s'agit de codes qui souvent ne se trouvent pas dans le commerce. Le partenariat n'est pas de la sous-traitance ; un partenaire qui est le plus compétent dans le monde n'est

pas pour moi un sous-traitant.

M. -O. M. : Encore une question ?

J.-P. Puel : J'ai une question qui s'adresse aussi à Bruno Stoufflet. Bruno parlait de problèmes multi-échelles : vous avez besoin de gens formés à la recherche de pointe, vous avez besoin de collaboration avec les laboratoires en mathématiques appliquées. Il y a des problèmes d'échelles de temps. Pour former quelqu'un ou pour lancer une recherche de fond sur des problèmes dont vous venez de parler, logiciels, multi-fluides, Navier-Stokes, etc., il faut du temps, c'est un investissement à long terme et vous avez des problèmes industriels dont l'échelle de temps est complètement différente et selon la conjoncture économique l'échelle peut varier du tout au tout. Comment concilier ces choses contradictoires ? Ces considérations sont aussi vraies pour l'industrie pétrolière pour en avoir discuté avec Monsieur Jablon.

C.M. : Je réponds brièvement. C'est simple : premièrement dans l'industrie aéronautique, comme on fait de la haute technologie, on ne peut pas se passer des outils indiqués et en trente ans cet investissement recherche n'a jamais décliné, et ce n'est pas maintenant que cela risque de changer, et il n'a jamais varié en flux, y compris lorsqu'on a eu des problèmes d'effectifs et de rentabilité dans notre entreprise, on a continué à investir dans ces outils de recherche qui sont notre survie.

M.-O. M. : Claude Jablon voulez-vous répondre ?

Claude Jablon : Oui, effectivement j'ai déjà eu l'occasion de discuter de cette question. Je suis assez d'accord avec ce qui vient d'être dit : au moins au niveau de grandes entreprises il faut bien évidemment tenir compte des marchés de l'environnement, c'est-à-dire du court terme et par ailleurs il faut mettre en place des structures et des organisations qui assurent une certaine continuité des efforts de recherche pour préparer l'avenir. Dans l'industrie pétrolière et l'industrie chimique, que je connais un petit peu, en 20 ans on a connu des hauts et des bas assez spectaculaires, il suffit de regarder les variations des prix du brut sur cette période, il n'empêche qu'on a toujours continué à investir sur du travail de compréhension de fond, sur des relations universitaires, mais ceci sur des sujets qui sont assez couplés avec nos besoins scientifiques. A l'échelle de nos entreprises on a moins le syndrome que peuvent avoir des entreprises plus soumises à l'hyper-réaction, à telle ou telle variation de l'environnement, à des échelles courtes.

B. S. : C'est vrai que l'on fabrique des produits assez pointus qui doivent satisfaire à certains niveaux de performances et ceci passe par la maîtrise des logiciels qui servent à les concevoir. Chez Dassault-Aviation on s'est toujours tenu au développement de codes de structures, on continue à les développer alors qu'il existe beaucoup de logiciels du commerce auxquels il a été fait allusion, car c'est pour nous le seul moyen d'arriver à des modélisations de très haut niveau et ceci est toujours une clef pour avoir des produits performants. Cet aspect n'était pas jadis dans l'esprit d'un directeur général ou d'un PDG, mais ils l'ont

bien compris aujourd'hui et même si on fait une analyse économique, acheter un logiciel extérieur pour des domaines où l'on va déployer un logiciel pour un grand nombre d'ingénieurs, il est plus rentable de le développer en collaboration avec des laboratoires de recherche, comme cela a été dit. Sur tous les plans cette stratégie n'est pas remise en cause et encore pour longtemps.

Edwige Godlewski : A partir de ces dernières réponses pensez-vous être représentatifs de la recherche scientifique ?

B.S. : Du monde aéronautique, pas forcément, car nos équivalents, même aux États-Unis, n'ont pas nécessairement pris cette option. Il existe de très grosses structures, comme par exemple la NASA, qui développent des codes, elles disposent de gros centres de recherches qui leur développent des codes, mais en Europe, c'est plus fréquemment le cas.

M.-O. M. : Patrick Lascaux, vous êtes directeur scientifique au CEA, est-ce que vous réagissez à tout ce qui vient d'être dit ? Vous travaillez avec des calculateurs très puissants et vous m'avez dit que vous étiez dans les huit plus puissants. On parle en téraflop, pétaflop, etc., c'est-à-dire des calculateurs qui effectuent des milliards de milliards d'opérations à la seconde. Ceci met en jeu beaucoup de mathématiques, évidemment.

Patrick Lascaux : Effectivement le CEA a commencé à faire de la simulation numérique depuis déjà un peu avant les années 1960. Dans le domaine nucléaire c'est évident en ce qui concerne les réacteurs, leur fonctionnement pour produire de l'énergie où il faut traiter des problèmes de neutronique et d'hydraulique, etc. ou pour les applications militaires où il faut, là aussi, faire des simulations d'explosion de fonctionnement ce qui fait intervenir la physique des plasmas, la fission, la fusion, etc. En fait je vais peut-être prendre un ou deux exemples différents de ceux qui ont été traités auparavant : le discours sur la modélisation qui est de plus en plus envahissante, vous le connaissez par cœur et je pourrai reprendre à peu près les mêmes thèmes. Compte tenu qu'au CEA il y a eu des évolutions - il n'y a pas eu que le nucléaire mais il y a aussi, pour des raisons historiques, d'autres types de recherche menés, en climatologie, en biologie, en imagerie médicale, toutes disciplines qui nécessitent aussi de la modélisation - une dont on n'a pas encore beaucoup parlé : le traitement de grandes masses de données. En particulier tout ce qui concerne l'instrumentation autour de grandes expériences de physique génère un nombre considérable de données qu'il s'agit d'interpréter ; ceci est également vrai en imagerie médicale. Marie-Odile a parlé de l'ordinateur acquis voici un an et demi, c'est un ordinateur TERA car il a une puissance de 5 téraflops ce qui est un peu dans la lignée de ce qu'on fait les Américains ; cet ordinateur n'a pas pu être acheté à des constructeurs français. Au moment où il a été acheté il était au cinquième rang des ordinateurs les plus puissants, le temps passant il est maintenant au huitième rang. On n'en tire pas spécialement de gloire, ce qui est important est ce qu'on en fait. Une chose importante est qu'il produit un énorme volume de calculs et arriver à visualiser dans des millions, voire des milliards, de mailles n'est pas évident. Il ne s'agit

pas forcément de mathématiques de très haut niveau, mais cela demande tout de même un certain nombre de techniques qui sont nécessaires lorsqu'on dispose des giga ou des giga pétaflops, et si on ne sait pas analyser les résultats cela ne sert pas à grand-chose.

Je voudrais reprendre des exemples dont on a déjà beaucoup parlé : le problème de la modélisation sur lequel on se repose car on ne peut plus faire d'expériences, ou on n'a jamais pu en faire. Premier exemple : on ne va pas s'amuser à provoquer un accident de réacteur nucléaire pour le plaisir, on est obligé de le modéliser. Deuxième exemple : vous savez que la France a signé le traité de non prolifération des essais nucléaires et par conséquent on ne peut plus faire des essais nucléaires, donc si on veut valider les calculs il faut le faire d'une autre façon que par l'expérimentation. On fait de la validation du logiciel de simulation partie par partie. On ne peut pas simuler complètement l'accident de réacteur, ni les effets d'une bombe nucléaire : on valide, étape par étape, morceau par morceau, le couplage entre la modélisation, la simulation numérique et la validation physique. Je reviendrai plus tard sur les besoins de mathématiciens pour développer des logiciels, pour faire de la résolution numérique de systèmes d'équations aux dérivées partielles compliquées, pour cela on aime bien avoir des gens qui ont une double compétence, comme l'a dit Monsieur Mari et ceci vous renvoie aussi à la première table ronde sur les formations car, à côté de mathématiciens pointus qui seraient des professionnels des mathématiques, on n'a pas forcément des gens qui ne sont que mathématiciens. Au CEA on aime bien collaborer avec des universitaires, du CNRS par exemple. Pour la majorité des développements on privilégie la double compétence : mathématiques-physique, mathématiques-biologie, mathématiques-chimie. Un exemple qui n'a pas été traité avant mais qui est typique au CEA, c'est le laser de puissance qui permet d'accéder, en particulier, à la fusion par confinement inertiel : on met deux gaz qui, portés à très hautes températures, font de la fusion, donc dégagent de l'énergie dans une petite bille qu'il faut imploder en mettant de l'énergie laser tout autour et cette énergie laser est concentrée dans une petite boîte. Il faut comprendre que tout ces phénomènes se déroulent très rapidement : il faut que l'implosion de la petite bille soit parfaite, ce qui nécessite de mettre au point tout le système par simulation de manière à remplacer des expériences très coûteuses, c'est-à-dire qu'il est nécessaire de développer des codes tridimensionnels en hydrodynamique radiative pour vérifier que les implosions se passent bien, qu'on n'a pas d'instabilités ; il s'agit là de calculs très fins, très précis dans des millions, des milliards de mailles dont j'ai parlé précédemment. Rendre la simulation plus précise, c'est ce qui a été dit, c'est essentiellement introduire plus de physique et plus de finesse de description dans les maillages. Les gros ordinateurs dont j'ai parlé se vendaient avec le slogan : "plus de système, plus de physique" ! Il ne faut pas faire d'approximations sur la géométrie, il faut essayer de mettre toute la physique possible et je le répète faire le moins possible d'approximations. Je pourrais donner d'autres exemples que l'on peut retrouver dans d'autres industries, et non seulement au CEA, où l'on a aussi, comme cela a été évoqué, des passages d'échelles : passages du micro au macro comme dans le domaine des matériaux où à partir d'une description

au niveau atomique on essaie d'introduire de la physique pour décrire des lois de comportement qui correspondent à de la modélisation à des échelles supérieures ; là aussi on a besoin de puissance de calcul, mais c'est ici qu'un mathématicien avec ses seules mathématiques ne fait rien du tout, il faut qu'il soit associé avec des physiciens, il faut qu'il ait une double compétence. En fait il s'agit toujours d'équipes pluridisciplinaires où se rencontrent des mathématiciens et des physiciens.

Dernière chose, pour répondre à une question, non pas d'embauche car le CEA embauche aussi des mathématiciens, mais sur la formation : au CEA on a énormément de thésards, ainsi cette année il y a eu 200 bourses de formation à la recherche pour l'ensemble du CEA plus une centaine d'autres bourses attribuées dans des associations industrielles ou par les régions. Il ne s'agit pas uniquement de mathématiques, c'est le total des bourses-sciences, mais sur le nombre il y a des bourses pour des mathématiciens.

M.-O. M. : Réactions ? Je voudrais souligner le fait que, tous les trois, vous insistez beaucoup sur le besoin de couplage, d'associations entre physiciens et mathématiciens. Est-ce vraiment un problème aujourd'hui ? Dans le monde de l'industrie, vous avez du mal à vous rencontrer entre recherche fondamentale en physique et en mathématiques ?

B. S. : Ce n'est pas un problème dans l'industrie mais il s'agit plutôt des programmes qu'on lance. Ce que je soulignais tout à l'heure, c'est une difficulté qui n'était pas aussi forte dans le passé : les dialogues entre les équipes de mathématiciens et de physiciens étaient plus faciles. En France les domaines scientifiques sont séparés et cloisonnés ; des efforts sont faits, par exemple au CNRS, pour rendre les équipes plus pluridisciplinaires mais je trouve que ce n'est pas assez efficace, ça ne va pas très vite et je ne suis pas sûr que ça marche vraiment. Nous avons des équipes multidisciplinaires mais en face on se heurte à une recherche assez cloisonnée ; il y a là un thème de réflexion pour savoir comment établir un dialogue plus efficace, comme il l'était dans le passé. On a un problème de dialogue avec les mathématiciens appliqués.

Christian Peskine, responsable pour les mathématiques au CNRS. Ce qui me frappe dans ce débat, et j'ai attendu un peu avant d'intervenir, c'est que des difficultés essentielles apparaissent déjà. C'est cette énorme demande de mathématiques de la part de l'industrie, des grands groupes industriels, en face d'une école mathématique, qui, chacun le reconnaît, est probablement la deuxième au monde, une des mieux structurées, et l'absence totale de projets structurés de coopération entre ces deux univers. C'est là où se placent les besoins très importants et j'espère que cette table ronde permettra d'avancer un peu, et au-delà, permettra d'organiser des réunions de travail sur le fond. En passant, une des premières démarches stratégiques que j'ai aperçue dans cette direction est celle de la SNECMA qui s'était adressée au CNRS en disant : "Vous avez 40 laboratoires de mathématiques, nous avons des problèmes, comment pouvons nous mettre en contact nos ingénieurs et les vôtres pour essayer de les faire dialoguer" ? Ceci est l'un des problèmes le plus difficile comme on l'a déjà expérimenté au début de

cette opération. Ce dialogue est difficile parce, que c'est une spécialité française, les gens sont hyperspécialisés, ils ne veulent faire que ce qui les intéresse et de plus à court terme, ils ne sont peut-être pas motivés par d'autres moyens comme dans d'autres pays qui ont des systèmes plus souples. On connaît un inconvénient du système universitaire français : il a un système unique d'évolution, de promotion, il a une dynamique interne forte ; il y a le même inconvénient de l'autre côté : l'industrie française est extrêmement stratégique sur le plan économique, mais permettez- moi de le dire, elle ne l'est absolument pas sur le plan de la recherche en tout cas pas globalement. Le projet de recherche manque et ceci apparaît de plus en plus fortement dans cette discussion.

P.L. : Je voudrais dire qu'effectivement, dans le cadre du CEA, il existe un certain nombre d'unités mixtes qui ont été créées, plus précisément de laboratoires de recherches. Il en existe par exemple entre le CEA de Bordeaux et le département de mathématiques appliquées de l'université de Bordeaux et c'est un état de choses dont on est très satisfait. Nous allons passer un contrat avec l'Ecole centrale. Mais ceci n'est pas suffisant, je suis tout à fait d'accord, mais ça va dans le bon sens.

Colette Guillopé : Je voudrais intervenir à nouveau : en ce moment nous sommes en train de mettre en place la réforme LMD et en fait, je me fais énormément de soucis avec les étudiants que nous avons actuellement. La crise des vocations scientifiques, le fait que les étudiants, essentiellement, veulent faire une seule chose et que l'on a beaucoup de mal à leur faire apprendre plusieurs choses : de la physique, des mathématiques, de l'informatique. On forme des étudiants en mathématiques et en informatique mais ils ne veulent pas faire de physique. On ne comprend pas très bien comment il peut être possible de faire coïncider cette image du monde industriel dont vous parlez et l'image de l'enseignement pour des étudiants que nous allons former. Comment ces mondes vont-ils interagir dans les recrutements d'étudiants chercheurs, d'ingénieurs ? Le problème est le même pour les ingénieurs : on manque aussi d'ingénieurs, le problème ne touche pas seulement l'université.

B. S. : Je suis un peu étonné par ce que je viens d'entendre : que les étudiants veulent plutôt se spécialiser dans un domaine et ne pas faire plusieurs choses. Ceci semble se confirmer par les réactions de la salle.

C. M. : Mais on devrait pouvoir expliquer que la nature est toujours multi-quelque chose. Nous sommes prêts à les accueillir pour le leur expliquer.

B. S. : Cette remarque est importante. Il y a quelque chose à faire pour montrer comment vit le monde industriel et ce qu'il manipule. Je voudrais apporter une réponse à la question soulevée par Marie-Odile Monchicourt et évoquée par Christian Peskine sur l'hyperspécialisation, le mal français de la spécialisation purement mathématique. Un élément de réponse pourrait être une analyse de la façon dont s'effectuent les recrutements des jeunes au CNRS, sur quelles bases.

Etienne Pardoux : Je ne voudrais pas trop critiquer nos étudiants, mais plutôt aller vers une autocritique : les défauts des étudiants à l'université sont le reflet des défauts des enseignants. Je pense que les universités proposent, dans l'ancien

système universitaire de second cycle, des formations très mono disciplinaires et il y a très peu d'universités qui cherchent une certaine mixité de différentes disciplines contrairement aux écoles d'ingénieurs qui elles, au contraire, mélangent trop de disciplines ; les élèves ingénieurs n'approfondissent rien du tout, leur formations sont trop superficielles, alors qu'à l'université on a trop tendance à ne faire qu'une seule discipline. On n'arrive difficilement à mettre un peu plus d'informatique dans les filières de mathématiques ou à permettre à un étudiant d'aller faire de la physique ou de la biologie : ceci est très difficile. Il ne faut donc pas trop critiquer nos étudiants. Un autre point porte sur l'ouverture à l'entreprise ; il est vrai que les étudiants dans les universités ne sont peut-être pas très ouverts sur le monde industriel et pas très intéressés par les débouchés qu'il propose, mais je suis personnellement convaincu que les enseignants en sont responsables car ils ne leur apportent pas du tout d'ouvertures dans cette direction.

M.-O. M. : Une dernière intervention sur ces points et après nous retrouverons Péchiney.

Question : J'ai fait des études de mathématiques et il m'a été très difficile de convaincre, d'une part les mathématiciens que je faisais des mathématiques intéressantes et d'autre part les physiciens que je faisais de la physique intéressante. Après mon doctorat j'ai enseigné les mathématiques à l'université et j'ai fait de la recherche en physique théorique et depuis trois ans je fais de l'informatique. Vraiment, à l'université et à Normale Sup, le pluridisciplinaire était très mal vu ; le discours de tous les professeurs était que le pluridisciplinaire représentait l'avenir, mais dans les faits c'est très différent.

M.-O. M. : Jean-François Boulier, vous voulez intervenir ?

Jean-François Boulier : Je trouve votre remarque, Monsieur, sur l'immersion d'un certain nombre d'enseignants dans la vie professionnelle, tout à fait juste. Je voudrais donner simplement un exemple. La chercheuse en France qui en mathématiques financières, puisque c'est le sujet qui moi m'occupe tous les jours, est la plus connue dans le monde est Nicole El-Karoui ; elle a passé pas mal de temps auprès de banquiers, de banquiers d'investissement, je l'ai moi-même accueillie dans mon laboratoire - je suis à la tête d'un laboratoire -. Elle est allée dans des salles de marché, chez des gérants de portefeuilles et elle continue d'avoir ce genre d'activités et je crois que ce n'est pas un frein à l'expérience scientifique, je crois au contraire que c'est un très grand moteur d'ouvertures et aussi la possibilité d'acquérir une belle curiosité. C'est la vie des entreprises ou la vie réelle qui apporte de nouvelles idées et de nouveaux problèmes. Je crois que ceci est quelque chose que l'on pourrait essayer de cultiver mieux, c'est-à-dire de faire en sorte que non seulement les étudiants peuvent y avoir accès par les stages et les post-doc, mais aussi que le corps enseignant puisse en bénéficier.

M.-O. M. : Merci Jean-François Boulier, mais je voudrais préciser qui vous êtes car tout le monde ne le sait pas. Vous êtes directeur-adjoint, responsable de la gestion des taux au Crédit Lyonnais et vous nous parlerez tout à l'heure des méthodes que vous utilisez pour protéger nos économies et que là il y a des mathématiques !

Claude Vangoren, vous êtes directeur du centre de recherche d'un laboratoire des fabrications, laboratoire en charge de la recherche et du développement industriel de la branche aluminium primaire de Pechiney. Quelles sont vos relations avec les mathématiques ?

Claude Vangoren : Je ne veux pas vous faire l'injure de présenter Pechiney par les temps qui courent mais peut-être en introduction et pour éviter de répéter ce qui vient d'être dit, je vais essayer de me faire le représentant de l'industrie lourde traditionnelle par rapport à l'industrie "high-tech" qui a été présentée jusqu'à présent. Je crois qu'on a découvert l'aspect modélisation sans doute un peu plus tard, avec sûrement une approche plus modeste en moyens par comparaison avec ce qui a été présenté pour l'industrie aéronautique. Cette observation met en évidence quelques variantes et une autre composante : dans notre industrie on a tout un volet de conceptions, de procédés, de technologies, puis tout un volet d'opérations, d'exploitation de ces technologies. Puisqu'on a évoqué précédemment l'évolution et l'augmentation des puissances de calcul, on voit une transition de l'utilisation des modèles de simulation numérique depuis les applications de conception vers des applications d'aide à la production et à l'exploitation. C'est une tendance assez importante et par rapport à l'évolution des besoins qui ont été mis en évidence dans cette table ronde, il y a toute une zone d'activités qui sera assez porteuse dans les années qui viennent et elle constituera des espèces de surcouches logicielles à la disposition des équipes en charge d'exploitation d'installations et d'équipements, surcouches logicielles qui reposent sur des logiciels de simulation validés, calés, prouvés dans des domaines d'exploitation bornés dans lesquels on sait qu'on a une robustesse établie ; c'est peut-être là une retombée dans nos métiers de l'augmentation des capacités de calcul. Une deuxième évolution, que la simulation et la modélisation numériques accompagnent, c'est l'intégration aval vis-à-vis de nos clients ou l'intégration de nos clients vers nous ; ceci est une particularité de la branche métallurgie de transformation de Pechiney où, de plus en plus, essentiellement dans l'aspect aéronautique de l'industrie aéronautique et dans l'industrie automobile, on a un transfert vers le producteur de semi-produits d'études de conception d'ensemble ce qui veut dire que le but des activités de modélisation et de simulation se déplace ou se complète d'un focus qui était très traditionnellement orienté sur les produits internes de l'entreprise, vers un focus qui intègre les besoins du client. Et ceci est très typique de l'aéronautique et de l'automobile. Sans reprendre tout ce qui a été dit, mais en revenant sur les enjeux à venir, on voit clairement tout ce qui va vers l'intégration de plus de physique, de prise en compte de la complexité des phénomènes, d'approches non-linéaires ; tout ce qui a été dit sur le transitoire, sur les couplages entre le thermomécanique et la MHD, sur la multiphysique se profilent dans nos activités. On doit étudier les couplages entre différents domaines ou entre différentes zones d'applications et des études de modélisation et de simulation.

M.-O. M. : Comment faites-vous au sein de Pechiney lorsque vous avez besoin de collaborateurs ? Ressentez-vous un manque dans l'entreprise ? Vous adressez-

vous à gens extérieurs, à des universitaires ?

C. V. : Oui, absolument ; si je suis ici, c'est aussi parce que nous avons une collaboration universitaire de longue date avec Claude Le Bris et avec l'Ecole des Ponts, collaboration qui est une illustration de ce qui se fait chez Pêchiney. Pour répondre à une question déjà évoquée, notre philosophie est effectivement de nous appuyer sur des logiciels du commerce, généralistes, multi-physiques, car on n'est pas dans les mêmes champs d'applications que mes collègues pour qui ce sont les outils mêmes des simulations, au cœur des métiers. Nous avons l'approche de nous appuyer sur des logiciels commerciaux et aussi d'avoir une approche de traitement de problèmes particuliers, de niches particulières, ou de besoins spécifiques, avec des coopérations universitaires et alors on est amené, soit à développer des codes, mais c'est une exception, soit à essayer de développer des espèces de parties qui pourraient s'imbriquer dans des logiciels particuliers. Ceci est une réponse à la question que vous avez posée. Si vous le permettez, j'ajouterai un point sur l'intégration logicielle : il y a un aspect qui peut aussi être intéressant, c'est que, entraîné par cette intégration en amont du client, en aval chez nous il existe un domaine particulier qui est aujourd'hui un frein à notre efficacité, à notre rapidité de traitement des problèmes : l'intégration des logiciels de simulation et la CAO, ce qui implique des limitations à l'efficacité de fonctionnement. De la même façon on est tous d'accord sur le piège de la simulation utilisée au-delà du raisonnable et des risques de gaspiller l'intérêt de la puissance de calcul, néanmoins je le crois encore plus pour des problématiques industrielles de résolution de problèmes à court terme et plus si cela concerne des problèmes d'opérations, de support d'assistance technique d'opérations où, là, le taux de marge est un paramètre fondamental de l'exploitation. Avoir des temps de calcul qui permettent de traiter une question et d'en donner une réponse rapide est fondamental pour nous, surtout quand on a une question qui se pose en quasi temps réel pour des situations d'exploitation et d'équipement.

M.-O. M. : Claude Jablon, je vous propose de prendre la parole tout de suite. Vous êtes directeur scientifique chez TOTAL et vous avez assisté aux grandes évolutions dans le domaine de la simulation et maintenant vous êtes face à d'autres questionnements.

Claude Jablon : Je voudrais parler pendant 15 secondes de TOTAL, même si vous connaissez notre nom. TOTAL une grande entreprise pétrolière et chimique, peut-être au quatrième rang mondial, ce qui n'est pas mal quand on pense que la France n'est tout de même pas un grand pays pétrolier. Nous sommes quatrième mais le premier, Exxon-Mobil, est trois fois plus gros que nous et les deuxième et troisième, Shell et BP, sont deux fois plus gros que nous. Autrement dit, on se trouve quand même dans une situation dans laquelle il faut vraiment se battre, car ces géants internationaux ne nous feront aucun cadeau, c'est un combat à la vie et à la mort, donc il faut que nous trouvions des facteurs de différenciation et parmi ceux-ci il y a la recherche ; la compétence scientifique et technologique est un des outils importants, ce n'est pas le seul.

Pour répondre à la question d'aujourd'hui je dirai que si j'étais venu parler devant vous il y a 20 ans, ou même il y a 10 ans, je vous aurais dit que chez nous les problèmes de simulation numérique étaient au cœur des préoccupations pouvant intéresser les mathématiques appliquées : on avait des problèmes sur les modèles de gisements pétroliers, des problèmes sur les grands codes de sismique et c'étaient des sujets sur lesquels on avait beaucoup de coopérations avec le monde universitaire et avec l'INRIA. Aujourd'hui, la situation a beaucoup évolué et je vais rejoindre des choses déjà dites par certains de mes collègues industriels, il existe maintenant des codes commerciaux qui finalement répondent, peu ou prou, à une grande quantité de problèmes que nous nous posions auparavant. On fait toujours beaucoup de simulation sur l'évolution de nos gisements : si vous visitez notre centre scientifique et technique vous trouverez des consoles très puissantes et des connexions sur des ordinateurs très puissants. Des gens font énormément de calculs pour le traitement de données sismiques, mais en fait, la ligne de front de la recherche, elle est moins que par le passé sur des questions de mathématiques appliquées, elle est plus sur des problèmes de validation des codes utilisés en particulier pour les modèles de gisement, codes qui sont très puissants, très performants. Malheureusement, un gisement représente des kilomètres cube, un puits représente quelques mètres cube et on a un échantillonnage de données assez faible et l'un des problèmes est de faire rentrer dans ces modèles des considérations de géométrie, de géostatistique, des choses qui sont plus au cœur de métiers des sciences de la Terre que des considérations de mathématiques.

On a posé la question de savoir quels sont aujourd'hui les problèmes en face desquels j'aurais envie de me tourner vers des spécialistes de mathématiques appliquées : je penserais à un domaine assez différent et je vais vous l'exposer en quelques minutes. Il faut savoir qu'avec les progrès de l'informatique, dont on a parlé déjà à plusieurs reprises aujourd'hui, on peut avoir une photographie, et même une photographie dans le temps, extrêmement poussée sur nos gros processus industriels. Si vous prenez une raffinerie, par exemple, vous avez des dizaines de milliers de capteurs et on rassemble les données de ces capteurs toutes les 30 minutes, voire toutes les minutes, et on est capable de les archiver ; on a des masses de données qui viennent de nos installations industrielles, d'un autre côté ces installations on sait les faire fonctionner, on les a optimisées morceau par morceau, Mais on a ainsi une sorte de trou béant, d'une part entre les modèles d'optimisation, de compréhension plus ou moins explicite du fonctionnement des installations, et d'autre part cette énorme masse de données qui arrive tous les jours. On manque de méthodologies pour relier les uns aux autres. Personnellement, il me semble qu'on a là un vrai chantier, je suis convaincu que, si on arrivait à faire le lien entre les deux, on pourrait davantage optimiser, soit en terme de fonctionnement, soit en terme de sécurité des installations sur lesquelles on travaille. Cette question de savoir comment on peut passer des masses de données un peu informes à de l'informatique, je crois qu'elle est vraiment ouverte. La communauté scientifique qui tourne autour du traitement des données dispose certainement de tas d'outils puissants ou au moins des concepts puis-

sants, mais jusqu'à présent nous n'avons pas réussi à trouver des personnes avec qui on pourrait dialoguer sur ce sujet.

Je vais terminer par la question des embauches, question évoquée à plusieurs reprises et qui est importante, et elle concerne un grand nombre d'entre vous ; compte tenu de ce que je vous ai dit, vous comprenez que ce n'est pas dans le domaine du soutien à nos grands codes de calcul qu'on serait intéressé par des personnes ayant un profil de mathématiques appliquées. Peut-être les sociétés sous-traitantes qui nous fournissent ces codes pourraient être intéressées, mais nous souhaitons des personnes qui connaissent la géologie, la géostatistique, la physique et qui sont capables d'adapter leurs connaissances aux problèmes opérationnels que nous rencontrons. En revanche sur le sujet dont je vous ai parlé, du passage des données à l'informatique, il représente un champ qui est ouvert et nous sommes tout à fait disposés à discuter avec ceux d'entre vous qui seraient intéressés pour mettre sur pied un programme de recherche en commun.

M.-O. M. : Est-ce que quelqu'un veut réagir à ce que Monsieur Jablon vient de dire ?

Edwige Godlewski : Je voulais simplement faire remarquer que pour des mathématiciens appliqués, se mettre à faire un peu de géophysique pour bien comprendre ce que vous voulez intégrer dans vos modèles est peut-être plus facile que faire des mathématiques pour des étudiants qui n'ont fait que de la géophysique lesquels auront peut-être plus de mal à comprendre les équations, les modèles mathématiques qui sont utilisés dans les logiciels de manière à les modifier, à les adapter. La double compétence est-elle à encourager ? Tous, avez-vous les moyens d'agir sur les milieux universitaires, sur le grand public pour que le message de la double compétence dans la formation passe ? On a parlé de cloisonnement, si on reste tous sur nos positions on n'avancera pas !

M.-O. M. : Chez TOTAL, vous donnez-vous la possibilité de répondre à vos attentes ?

C. J. : Sur la question du cloisonnement soulevée par un certain nombre de collègues, je dirai que nous avons des problèmes qui, à terme, sont des problèmes opérationnels guidés par le fait que l'on doit se battre avec des objets naturels, des grands systèmes industriels complexes. Après, la question qui se pose, c'est celle de nos besoins scientifiques et celle d'aller chercher les compétences scientifiques dans les équipes qui peuvent nous les apporter. De ce point de vue, je pense que l'industriel est finalement assez bien placé pour faire le fameux pluridisciplinaire que par ailleurs on essaie de rechercher dans les organismes publics avec plus ou moins de bonheur. On est, nous-mêmes, sur un problème donné, relativement bien placés pour décroisonner notre problème ; nous n'avons pas pour ambition de changer le système de la recherche et de l'enseignement français, ceci est un peu au-delà de nos forces. Sur la double compétence ce qui me semble important c'est d'avoir un métier de base et d'élargir un peu son horizon : le monochromatisme des étudiants me surprend et me trouble un petit peu, je crois qu'il faut avoir des connaissances de base et après être un peu curieux. La question,

vous l'avez formulée vous-même : "Va-t-on prendre un mathématicien appliqué et lui apprendre de la géophysique ou un géophysicien à qui on va apprendre des mathématiques ?" Je n'ai pas de réponse évidente, ce que je peux dire c'est que dans des métiers comme les nôtres, où on a en face de nous des objets naturels, je crois que, assez souvent, la formation de base par les sciences de la Terre a quand même un avantage. C'est un peu comme l'anglais : si vous l'apprenez après 40 ans, vous aurez plus de mal.

C. M. : Je voudrais revenir sur quelques uns des exposés, en particulier sur le traitement des données. L'énorme quantité de données que l'on a, plusieurs l'ont signalé, au niveau du suivi de ce qui se passe en production ou bien dans un "process", au niveau sismique et autre, c'est une caractéristique de l'évolution actuelle. On récupère et on doit traiter des quantités considérables d'informations et, en général, on ne sait pas ce qu'il faut en faire, on ne sait pas en sortir les informations pertinentes et il y a là des axes de recherches mathématiques car on n'est plus dans les domaines de l'analyse des données, des statistiques classiques ; il existe des demandes extrêmement importantes et des axes très forts et je crois que dans le milieu industriel, tous secteurs confondus, c'est un dénominateur commun et dans cette direction il y a vraiment beaucoup de choses à faire ici en France.

M.-O. M. : Philippe Lacour-Gayet, vous êtes directeur scientifique, responsable de la recherche et développement chez Schlumberger et vous travaillez beaucoup entre la France et les États-Unis.

Philippe Lacour-Gayet : Je voudrais tout d'abord vous parler en quelques minutes de mon entreprise : Schlumberger est une compagnie extrêmement internationale et nous avons environ 3000 personnes qui travaillent en recherche et développement et 90 % d'entre elles travaillent hors de France. Je ne me sens pas très compétent pour régler les problèmes franco-français, par contre les mathématiques sont très importantes. On a un système de communauté scientifique et on a 159 personnes qui s'identifient comme mathématiciens ; tout à l'heure j'ai entendu dire qu'on n'avait pas le droit de dire qu'on était mathématicien ! Sur les 159 mathématiciens, 82 ont un doctorat d'état en mathématiques ; ils ne sont pas tous français : ils peuvent être russes, américains, etc.

Les applications des mathématiques dans une entreprise comme Schlumberger sont en nombre gigantesque. L'imagerie sismique est peut-être le domaine le plus grand, les ordinateurs ont permis un progrès considérable, mais on reste une migration d'un "survey" sismique tridimensionnel et ceci peut prendre trois mois sur un ordinateur pas pétaflop, car malheureusement on ne dispose pas encore d'un tel outil, mais quelque chose qui fait quelques téras prend trois mois de calcul et là, je rejoins ce qui a été dit tout à l'heure, le rôle des mathématiques n'est pas d'écrire le logiciel, c'est de comprendre les méthodes qui permettraient d'aller beaucoup plus vite. On a un jeune mathématicien russe qui, en utilisant des méthodes d'optimisation des grilles, méthodes extrêmement astucieuses, - où calculer et quoi calculer ? -, a augmenté d'un facteur 1000 la vitesse de migration

des ondes : le calcul de migration est 1000 fois plus rapide, ce qui correspond à un facteur 10 sur chacun des axes en tridimensionnel. Il s'agit véritablement d'un problème de mathématiques, pas d'un problème d'ordinateur.

Un deuxième sujet très intéressant est celui des écoulements multiphasiques dans les milieux poreux, c'est un problème très compliqué, il est non-linéaire, les propriétés du transport dépendent de la composition de ce qui est à l'intérieur et la façon dont on pose le problème est, en gros, des différences finies et il conduit à la fin à la résolution d'un problème d'algèbre sur un graphe très compliqué, très connecté que l'on veut traiter en calcul parallèle et là on a un jeune mathématicien saoudien, je trouve cela extraordinaire car il n'est pas facile d'être saoudien et mathématicien, mais les mathématiciens nous arrivent du monde entier ; ce jeune Saoudien a commencé ses études en Arabie Saoudite dans une université à Dahra et aujourd'hui il est professeur de mathématiques à Stanford. Il a trouvé une méthode de découplage de variables permettant de calculer l'une des variables, qui est la pression que l'on traite avec une fréquence d'échantillonnage extrêmement grande, les autres variables sont mises de côté et traitées avec des fréquences beaucoup moins grandes ; ceci a permis de gagner un facteur 20, ce qui est considérable dans les calculs d'écoulements multiphasiques.

On ne s'intéresse pas uniquement au pétrole, mais aussi aux cartes à puces où on a des problèmes de cryptographie, qui comme vous le savez font appel à la théorie des nombres dont Hardy disait qu'il avait choisi cette branche des mathématiques car elle n'aurait jamais d'applications. Une découverte des mathématiques dans ce domaine est la décomposition d'un grand nombre en grands nombres premiers. Si on trouvait une méthode astucieuse pour faire une telle décomposition, elle détruirait les cartes à puces et à ce propos c'est un bon défi pour des mathématiciens car ils deviendraient extrêmement riches !

On a donc énormément de problèmes. Il me semble très bien percevoir, dans la salle et dans l'industrie, une espèce de malaise entre l'industrie et les mathématiques, les applications et les mathématiques. Il me semble qu'il y a deux responsabilités. D'abord je voudrais parler de la responsabilité des industriels : ce qui est formidable c'est que les industriels ont des problèmes concrets très difficiles dans lesquels ils sont prêts à mettre de l'argent car si on résout ces problèmes on peut faire des choses extraordinaires. Je pense que les industriels n'ont pas assez bien expliqué à la communauté mathématique les problèmes difficiles qu'ils avaient et on a essayé de le faire un peu ce soir mais il faudrait faire quelque chose de beaucoup plus profond pour faire un inventaire des grands défis. Ma compagnie a créé un organisme que l'on appelle "The Grand Challenge Problems" organisme destiné à poser aux mathématiciens des problèmes difficiles. Par exemple comment décrire des réservoirs qu'on ne voit pas car ils sont sous la terre, mais dont la géométrie, ou de manière plus complexe la topologie - c'est-à-dire les connexions entre les différentes parties - peuvent être définies de manière statistique. Quelle est la probabilité pour que deux compartiments soient connectés, c'est un problème qu'une école russe essaie de résoudre et qui paraît extrêmement difficile et ce problème rejoint des questions qui se posent en

biologie dans l'étude de la forme des protéines à partir du DNA ; il s'agit là aussi de problèmes de géométrie et de statistique. Malheureusement l'industrie n'a pas assez bien fait ce travail d'explication et je pense que, vous mathématiciens, seriez passionnés par la qualité des problèmes mathématiques qui sont posés. Nous n'avons aucune difficulté pour motiver nos mathématiciens qui travaillent sur ces thèmes. Mais pour ce qui concerne la responsabilité des mathématiciens, je voudrais dire que je me fais du souci lorsque je me tourne vers les mathématiques de pointe. On connaît les équations différentielles et tout ce qui se fait en "taupe", je parle de ce que les mathématiciens font aujourd'hui. Le 20 août 2002, Laurent Lafforgue a obtenu la médaille Fields, c'est tout de même un grand événement en particulier pour mon ami Bourguignon, événement qui démontre la qualité de la communauté mathématique française. Je lis ce que le journal "Le Monde" écrivait : "Le nouveau lauréat français a obtenu la médaille Fields pour sa publication intitulée : *Chtoukas de Drinfeld et correspondance de Langland* et dont le résumé précis est qu'il démontre la correspondance pour les GLR sur un corps de fonctions. A lui seul ce libellé reflète bien le caractère hermétique des travaux de pointe en mathématiques, la complexité des notions autant que leur degré d'abstraction les mettent hors de portée du "Vulgum Pecus" -c'est-à-dire nous !-. Néanmoins, -si vous connaissez Laurent Lafforgue, il essaie d'expliquer ses travaux avec un amour fantastique- Laurent Lafforgue ne désespère pas de faire percevoir la beauté des voies explorées par ses pairs, la beauté au cours des derniers siècles ". C'est "Le Monde" ! Mais j'ai là une citation de l' "Humanité" : "L'apport de Laurent Lafforgue est inaccessible au profane". [Ici une citation en anglais difficile à déchiffrer mais dont le contenu confirme les citations en français.] Ce qui me fait beaucoup de soucis, c'est que dans toutes les autres sciences les chercheurs de pointe et les industriels arrivent à se parler, en physique, qui est mon domaine, les physiciens qui travaillent sur des sujets pointus restent accessibles et on a des connexions assez bonnes et je pense qu'il y a un problème important en mathématiques : la vulgarisation, l'explication à un public averti de ce que font les mathématiciens, ne sont pas faites. C'est difficile, j'en parle souvent avec Monsieur Bourguignon, mais, à mon avis, ceci permettrait à la société de comprendre beaucoup mieux les mathématiques et leurs applications nouvelles vraiment créatives : Est-ce que Langland a une application pour Schlumberger ? Je ne sais pas, j'ai essayé de comprendre, ce n'est pas très facile, mais il y a quelque chose et je ne pense pas que la technicité des sujets soit une excuse. Il faut apprendre un langage, mais il en est de même en physique théorique, la théorie des champs n'est pas facile, mais les physiciens arrivent à se débrouiller pour être compréhensibles. Quand De Gennes a eu le prix Nobel, dans son interview à TF1 le soir où il a eu le prix Nobel, à la question du présentateur : "Monsieur De Gennes qu'est-ce que vous faites. Expliquez-nous avec des termes simples", la réponse a été : "Moi je travaille sur le repassage !" Il avait fait un travail sur la façon dont les tissus se froissent, c'est un problème de mathématiques et non de physique car il s'agit de la description du comportement des filaments des tissus qui ne vont pas se froisser et De Gennes avait calculé le nombre d'heures passé par les femmes à faire du repassage et il a parlé sur ce sujet. Je comprends

très bien vos critiques adressées aux industriels, elles sont tout à fait fondées et il faudrait faire quelque chose de sérieux, mais aussi de votre côté il y a une espèce d'herméticité derrière laquelle il n'est pas facile de voir ce qu'il y a de nouveau et d'intéressant qui peut sortir de ce que vous faites.

M.-O. M. : Quels sujets épineux ! Vous avez touché là où ça énerve énormément. Je sens que dans la salle des réactions se préparent !

Monique Pontier : Que mes collègues qui m'ont déjà entendue la raconter me pardonnent, mais je ne résiste pas à raconter l'anecdote suivante, anecdote racontée par le directeur d'IBM-France devant une assemblée d'une association de professeurs de mathématiques. Dans les années 1980, quand on a démarré les petits ordinateurs, IBM était jaloux d'une société rivale dont les microprocesseurs allaient plus vite. Donc suivant une technique classique d'espionnage industriel, on envoie un stagiaire dans la société rivale et le jeune fait son rapport en concluant : "si cela va plus vite chez les autres c'est parce qu'ils utilisent les nombres de Fibonacci". Le rapport suit la voie classique, il arrive au sommet de la hiérarchie et il redescend avec, en marge, de la main du chef : "Embauchez Fibonacci" !

M.-O. M. : Qui veut intervenir sur cette question qui est à la base de la grande difficulté du dialogue dont on parlait tout à l'heure : difficulté de compréhension entre les tenants de la recherche fondamentale et ceux de la recherche appliquée ?

Edwige Godlewski : Première réaction, je suis d'accord avec vous sur l'herméticité des mathématiques, mais concernant les retombées des recherches de Laurent Lafforgue elles posent le problème de la recherche fondamentale : vous ne pouvez pas savoir aujourd'hui à quoi peuvent servir plus tard ces recherches ; ceci me semble évident. Mais par contre pour la communication je suis d'accord.

P. L. : Prenez la théorie des nombres aujourd'hui : on voit très bien les problèmes qu'il faut résoudre pour craquer tous les codes des cartes à puces, des Indiens qui ne travaillent que sur ce sujet : ils ont même eu un résultat formidable que vous connaissez sans doute. Je ne crois pas du tout que le temps entre les découvertes en recherche fondamentale et les applications soit un obstacle : l'exemple des cristaux liquides est là pour le montrer. L'arrivée des cristaux liquides dans les montres a été très rapide. Je crois que si l'on se comprenait mieux, la vitesse de circulation des idées serait beaucoup plus grande : attendre 20 ans, c'est du gâchis !

M.- O. M. : Monsieur Bourguignon, on parle beaucoup de vos médailles Fields qui font une recherche en mathématiques dont on peut être extraordinairement fier. Que pensez-vous quand vous entendez ces industriels vous demander à quoi sert cette recherche, comment réagissez-vous ?

Jean-Pierre Bourguignon : Deux choses : tout d'abord les médailles Fields ne sont pas les miennes, mais celles de chercheurs qui ont été formés dans l'école mathématique française, c'est l'ensemble de l'école mathématique qu'il faut féliciter et pas seulement les personnalités. Sur ce qu'a dit Philippe Lacour-Gayet, on en parle souvent. Je crois que, malheureusement, un certain nombre d'entre

nous en sont très conscients et, dans la communauté, je suis connu comme étant du "poil à gratter" permanent et je dis que nous ne faisons pas les efforts nécessaires, que nous sommes trop frileux et que ce problème de la communication n'a pas été pris assez au sérieux et ceci nous coûte extrêmement cher, en particulier, en terme de motivation pour des jeunes de manière à les attirer vers les mathématiques. Philippe ne dit pas du tout, en tant que représentant de l'entreprise, qu'il veut absolument qu'on lui fasse des mathématiques qu'il puisse utiliser demain matin, il pense simplement que, dans la position stratégique dans laquelle il est, il sait qu'il a un besoin de mathématiques et il voit devant lui un brouillard dans lequel il n'a pas le moyen de distinguer les continents qui sont devant lui. Ce n'est pas tellement l'applicabilité immédiate que l'intelligibilité immédiate qui est en cause et je crois que là on a un effort considérable à faire collectivement pour trouver les noms pour dire les choses, pour qualifier ce que sont les percées en mathématiques et malheureusement je pense que nous, collectivement, nous n'y consacrons pas assez de temps et je dois dire de plus que nos méthodes d'évaluation, le temps passé par des collègues à faire des présentations à un public de jeunes, à un public d'industriels, est considéré par les commissions d'évaluation comme du temps perdu. Nous devons absolument réviser nos modes d'évaluation et, tant que l'on ne le fera pas, nous rencontrerons des difficultés. Il faut que ces travaux soient évalués pour de bon et lorsque l'un d'entre nous fait une mauvaise présentation il faudra dire que c'est une mauvaise présentation ; c'est la règle pour le travail scientifique, ça doit être la règle pour la vulgarisation.

M.- O. M. : Des questions ?

Christian Peskine : Il me semble que le débat est en train de dériver. On est dans une société de communication où tout est déformé et l'image des mathématiques, comme beaucoup d'autres choses, est déformée. On pourrait en parler à l'infini, mais je crois qu'il faut sortir de ce débat ; la question est de savoir si on est capable de mettre en place un système de communication entre l'industrie et une communauté mathématique qui, je le répète est très bien structurée, mais effectivement un peu frileuse. Pour en être capable il faut le vouloir et il ne faut pas se poser des questions du type : "Pourquoi faire aujourd'hui ce que quelqu'un d'autre pourra faire pour moi demain ?" Nous devons nous y mettre immédiatement, j'ai déjà rencontré la plupart des intervenants qui sont autour de cette table et nous avons déjà abordé ces problèmes de près ou de loin. Je crois que ce qu'il manque ce sont des contacts entre le monde industriel et les mathématiciens intéressés : chacun d'entre vous a eu ou aura des relations avec un groupe de mathématiciens. Lascaux a parlé du contrat avec Bordeaux, vous avez d'excellentes relations avec le laboratoire Jacques-Louis Lions et ici nous avons abordé une démarche à un cran supérieur. Il y a quelques grands centres mathématiques français et dans ces grands centres il faut organiser des rencontres régulières entre mathématiciens et représentants de la recherche industrielle. Je dirai même que Paris est probablement le plus grand centre mathématique au monde : il y a sur le site de Chevaleret 600 mathématiciens en activité qui couvrent un spectre complet. Je trouve extra-

ordinaire que l'on n'ait jamais réussi à organiser un séminaire mensuel au cours duquel des industriels viendraient parler de leur vie devant cette communauté de 600 personnes. Ceci devrait être possible, même si Chevaleret ne dispose pas d'une grande salle de réunion. Si on annonce clairement le désir d'avancer dans cette direction, si on sort du débat général sur les difficultés de la vie, on ira peut-être un peu plus vite !

Patrizia Donato : Je voudrais faire deux remarques : Monsieur Bourguignon a raison lorsqu'il dit qu'en général, à l'université, tout ce qui est didactique, tout ce qui concerne la vulgarisation n'est pas payant, tant que le système ne change pas, ce n'est pas encourageant pour les chercheurs. Deuxième point, la communauté mathématique doit faire un effort pour parler aux industriels et je pense qu'elle doit aussi faire un effort pour dialoguer en interne. Depuis très longtemps j'assiste à des séminaires et très souvent il est difficile, pour nous-mêmes, de comprendre le collègue qui fait un exposé au séminaire. Ce qui signifie que la tradition française de l'excellence en mathématiques ne l'est pas autant dans les exposés des séminaires où les intervenants parlent déjà à des niveaux techniques très élevés et c'est un effort pour nous-mêmes.

M.-O. M. : Une dernière intervention ?

Etienne Pardoux : La SMF et la SMAI ne pourraient-elles pas proposer un séminaire mensuel, au cours duquel des industriels viendraient poser des problèmes qu'ils ne savent pas résoudre et qu'ils voudraient résoudre et des mathématiciens qui pourraient exposer des mathématiques de pointe dans un langage compréhensible, ces mathématiciens ne seraient pas nécessairement des spécialistes du sujet ? Monsieur Philippe Lacour-Gayet nous disait que De Gennes parlait de repassage et il ajoutait que ce n'était pas de la physique, mais des mathématiques. Un des problèmes est qu'il existe de nombreuses choses qui sont des mathématiques et qui ne sont pas véhiculées comme telles : on dit qu'il s'agit d'informatique alors qu'en réalité ce sont des mathématiques et il faudrait que les mathématiciens se saisissent de ces problèmes qui sont des mathématiques, même si elles ne font pas partie intégrantes de leurs propres recherches.

C. M. : J'ai envie de vous répondre : "Chiche !". Quand et où ?

Amandine Aftalion : Je suis chargée de recherches au CNRS dans un laboratoire de PARIS VI, j'ai une formation en mathématiques et en physique, actuellement je travaille surtout sur des modèles mathématiques de la physique des basses températures en lien avec des chercheurs du laboratoire Kastler-Brossel de l'Ecole normale supérieure ; il s'agit de recherches très théoriques mais quand j'ai été recrutée au CNRS je me disais que j'avais du temps à consacrer à l'étude de choses nouvelles et éventuellement être consultante dans une grande entreprise. Je suis allée dans le centre de recherche de Schlumberger dans la région parisienne et j'ai rencontrée Patrice Ligneul et nous avons longuement discuté : j'ai expliqué ce que je savais faire, quelles étaient mes techniques et mes capacités et lui m'a parlé de ses problèmes, des problèmes numériques très en deçà de ce que je pouvais faire et des problèmes théoriques très intéressants du type problèmes inverses

mais très difficiles mathématiquement et pour lesquels on n'a pas encore assez développé d'outils qui permettraient de les traiter sous un angle qui intéresserait les industriels. Nous savons faire des choses très en amont, sur des problèmes simples, et prouver des résultats théoriques mais nous n'avons pas les capacités pour traiter ces problèmes à caractère industriel. J'ai appris qu'il existait, dans cette entreprise, un centre de recherches plus techniques aux Etats-Unis et que là-bas on pourrait avoir plus d'interactions avec des chercheurs, mais que le centre de recherches en France était plus appliqué et numérique.

Le deuxième point que je souhaiterais évoquer est mon expérience de participation à des congrès de physique : les physiciens ont peut-être la "chance" de pouvoir parler plus facilement de leurs problèmes. Pour illustrer mon propos je vais donner un exemple concret : Si vous vous retrouvez pendant un congrès à déjeuner avec un physicien, il vous dira : "Vous avez vu, dans votre verre, il y a les larmes du vin !" et c'est à partir des larmes du vin que commence une discussion sur la mécanique des fluides ou à partir d'une petite chose concrète le physicien va pouvoir parler de ce qu'il fait en mécanique des fluides et aller vers des choses de plus en plus compliquées. Je ne crois pas qu'il y ait beaucoup de problèmes mathématiques dont on puisse parler à partir d'une anecdote toute simple qui se passe à table, liée à la nourriture ou à un verre de vin !

P. L. : Je vais répondre à votre interrogation et à la question sur IBM. La première fois que je suis allé chez IBM, à l'époque il y avait Mandelbrot qui travaillait sur le chaos, je crois qu'il devait connaître Fibonacci ou son cousin et il nous a expliqué ce qu'il faisait : son objectif était de décrire les nuages et nous étions tous autour de la table et nous sommes allés regarder les nuages dans un ciel américain extraordinaire et tous ceux qui étaient là et qui étaient des modélisateurs de mathématiques disaient : "On n'y arrivera jamais !" Et, comme vous le savez on y arrive extrêmement bien : aujourd'hui le cinéma réalise des nuages virtuels d'une qualité extraordinaire. Des mathématiciens comme Mandelbrot arrivent à communiquer ce qu'ils savent faire et c'est peut-être ce qu'il faut faire ! Il faudrait qu'il y ait tous les mois dans "Le Monde" une rubrique qui explique les découvertes des mathématiques et même chose dans le "New York Times" et dans tous les grands journaux de la Planète. Si tous les mathématiciens du Monde s'y mettaient, je suis persuadé qu'ils y arriveraient.

M.-O. M. : Je donne la parole à Jean-François Boulier, le dernier intervenant. Vous êtes directeur adjoint, responsable de gestion des taux au Crédit Lyonnais. Vous avez évidemment besoin de mathématiques et des mathématiques extrêmement compliquées pour essayer de bien gérer nos économies. Votre responsabilité est énorme et dites-nous en quoi les mathématiques nous protègent du pire !

Jean-François Boulier : Tout d'abord la dernière de mes idées c'est de simuler des billets de banque ! Ce n'est pas cela qu'on fait avec les mathématiques. Pour commencer, une réflexion : la recherche associée à l'argent, la recherche associée à la finance est une idée relativement neuve ; neuve dans le monde des financiers parce qu'elle date d'un siècle environ et elle s'est accélérée fortement il y

a 30 ans mais c'est une idée complètement neuve dans le grand public. Or sachez que votre épargne, celle que je gère au Crédit Lyonnais, que mes collègues, mes confrères utilisent dans leurs fonds, cette épargne utilise énormément de mathématiques appliquées. Pourquoi ? Parce que dans le domaine des services à la fois en amont il y a des multitudes d'hommes et en aval il y a des multitudes d'hommes. A chaque fois nous avons à essayer de fabriquer des produits, des services qui, d'une part, correspondent à suffisamment de clients et qui, d'autre part, peuvent s'adapter en aval pour les faire bien comprendre et pour les intégrer dans la carte à puces à la disposition de la clientèle quand elle le veut.

Dans les services les besoins en mathématiques appliquées sont énormes. J'avais commencé à faire des études sur les écoulements dans les milieux poreux, non saturés, diphasiques ; j'ai fait cela pendant 8 ans et j'ai pris du plaisir à traiter des équations de diffusion non-linéaires ce qui supposait pas mal de mathématiques appliquées, mes compétences étaient dans ce domaine, mais j'ai fait un virage assez important à mon arrivée en 1987 au CCF, dans une petite banque qui avait besoin d'innovations et qui devait faire des produits avant les autres et donc avait besoin de plus de recherche que les autres. On m'a proposé un poste et là je suis passé des écoulements laminaires à la pleine turbulence : il faut rappeler que 1987 est l'année du premier krach boursier ; j'ai vécu ce changement qui a été radical. Cela a déjà été mentionné, mais j'ai dû me mettre dans le métier financier. Je disposais d'un gros bagage d'utilisation des mathématiques en mécanique des fluides, mais il fallait que je m'approprie un autre monde, celui de la finance. Si je n'avais pas eu la motivation de l'apprendre et de le comprendre c'était fini pour moi ! Je n'aurais jamais fait de mathématiques appliquées à la finance. Par la suite ma très grande surprise a été de m'apercevoir que beaucoup de problèmes, beaucoup de sujets que mes voisins de couloirs ou de bâtiments essayaient de traiter, étaient déjà modélisés dans le domaine de la mécanique des fluides, dans le domaine de la physique et que ces problèmes n'étaient pas si différents dès qu'ils étaient modélisés et posés sous forme d'équations. Il y avait quelque chose de très riche et très fort entre nous : nous avions un langage commun, celui de la modélisation et c'est très fort parce que cela va très vite ; c'est-à-dire que si j'arrive à reconnaître dans un problème évoqué par mon collègue de la SNECMA quelque chose qui appartient à la finance, le langage va aller très vite : l'effort de compréhension de ce qu'est le problème de l'autre, de ce qu'est sa modélisation permet d'aller très vite à une adaptation dans un autre domaine. Mais ce langage il faut le parler, il faut parler mathématiques mais il faut aussi parler des applications des mathématiques. Et dans le domaine financier c'est tout de même le grand bonheur et moi je me régale ! Il y a énormément de problèmes que le financier ne regardait pas avec l'oeil du mathématicien et tout d'un coup, c'est un peu comme en géologie où on redécouvre la Terre parce que l'on a un nouvel angle et cet angle est extrêmement puissant car tout d'un coup vous apportez toutes les solutions déjà connues dans d'autres domaines. Pour être rapide, l'essentiel de ce que les mathématiciens appliqués utilisent dans le domaine financier est tout ce qui tourne autour du risque. Pourquoi ? Parce que les marchés financiers sont volatils et ces "up and down" nous obsèdent ; nous gérons l'argent de

nos clients et nous évitons que ces "up and down" n'affectent trop leur argent. Evidemment si on ne fait pas prendre de risque, si l'argent dort il ne sera pas productif. On est bien dans un dilemme qu'il nous faut réellement assumer : assumer la prise de risque, donc on tombe dans le domaine des probabilités, là où on est très fort en France, mais après il y a les statistiques, c'est-à-dire l'estimation des paramètres pour avoir des modèles suffisamment robustes. C'est un terme que j'aime beaucoup : la robustesse. Un très beau modèle qui a bien fonctionné au cours de ces dernières années a beaucoup de chance de s'écrouler dans les deux prochaines années ; j'ai donc intérêt à avoir un modèle plutôt robuste qui s'adapte moins bien au passé mais dont je pense qu'il a une capacité à supporter des chocs, ceux que je ne connais pas encore mais qui vont arriver, je le sais, parce que c'est une activité humaine donc sujette à la folie, à l'engouement, à la précipitation et tout cela se termine dans des bulles et donc de très fortes montées des marchés, suivies de krachs comme on le voit depuis deux ou trois ans. Tout cela va obliger à avoir à la fois de très bons modèles mais aussi des modèles qui vont pouvoir être bien estimés et les statistiques ici sont très importantes. Dans le domaine des statistiques il existe une spécialité en finance, c'est l'économétrie c'est-à-dire les séries temporelles, la finance est une grosse consommatrice de séries temporelles : on essaie de bien comprendre le comportement des séries temporelles dans leur dimension "cross-section" et dans leur dimension "time-series". Tout ce qui est de l'ordre de la compréhension dans ces deux axes est important : c'est un multi-varié avec une dimension temporelle très particulière. Donc après ces étapes où l'on a fait des probabilités et des statistiques il faut essayer de gérer c'est-à-dire optimiser les avantages en essayant de réduire les risques et ceci est typiquement mon travail de gestionnaire de portefeuilles. La théorie moderne du portefeuille, théorie qui a maintenant une cinquantaine d'années, a inventé un algorithme pour construire des portefeuilles efficaces qui, pour un niveau de risque donné, assurent la meilleure rentabilité. Donc voilà quelque chose d'extrêmement concret, dû à H. Markovitch, prix Nobel évidemment et que nous essayons d'améliorer et qui est tout à fait fondamental dans notre industrie. Demandez à un gérant de portefeuilles s'il optimise son portefeuille, il va toujours vous répondre qu'il optimise son portefeuille ; donc tout le monde fait de l'optimisation. Ne soyez pas trop exigeants sur le "comment" car les réponses peuvent être parfois très variées ! Quelles sont les principales applications dans notre domaine ? Et bien tout ce qui relève des outils qui permettent d'évaluer les garanties, les instruments de protection contre les risques, ceci s'appelle des options dans le domaine de la finance, et tout ce qui relève de ce que l'on appelle les actifs contingents c'est-à-dire des produits dérivés des produits de base : les actions, les obligations qui sont traitées par les marchés. Tout cela utilise énormément de mathématiques. La deuxième application est tout ce qui relève de la mesure des risques ; j'ai été pendant trois ans responsable des risques dans ma banque, mon rôle était de contrôler que les traders ne prenaient pas trop de positions sur le dollar, sur les actions et c'est une activité qui requiert beaucoup de mathématiques appliquées puisque maintenant nous avons la possibilité d'utiliser, dans la réglementation internationale sur les fonds propres des

banques, des modèles internes. Qu'est-ce qu'un modèle interne ? C'est un modèle mathématique adapté aux instruments financiers sur lesquels on travaille et qui permet d'évaluer la perte maximale probable à un niveau de probabilité donné. On est là en plein dans les mathématiques appliquées et ceci est écrit dans la réglementation bancaire internationale et traduit en français. Enfin la dernière chose c'est gérer : on retrouve des préoccupations telles que celles de la gestion de "process", les nôtres consistent à gérer des choses très immatérielles puisque les titres sont totalement dématérialisés, néanmoins on retrouve exactement les flux, les mouvements, les aléas que décrivait Claude Jablon, c'est donc avec un peu les mêmes outils que l'on essaie de travailler.

Je voudrais ajouter quelques mots sur les domaines de recherche dans lesquels on a, aujourd'hui, besoin de mathématiciens : la recherche est très importante parce que c'est sur elle que repose l'innovation qui est le nerf de la guerre dans la compétition. Dans le cadre de mon activité bancaire c'est un domaine que j'essaie de développer en recrutant des talents et en organisant le circuit aval pour que la recherche débouche en produits. Un domaine tout à fait amusant qui s'est beaucoup développé récemment : le "Behaviour all finances" ; on cherche à comprendre le comportement des clients, des banquiers en situation financière affirmant, a priori, que l'homme était rationnel, ce qui était la grande vogue. Oui l'homme est rationnel, mais comment fait-il ? Pour étudier ses comportements on fait des études empiriques sur de très grands nombres de comptes pour déceler si les hommes et les femmes se comportent de la même façon. Ainsi on trouve une caractéristique masculine : les hommes ont plutôt tendance à avoir trop confiance ; quand ils ont réussi une bonne opération boursière, ils remettent deux fois la mise ! Les femmes le font moins et sur une longue période ce comportement semble meilleur ! Nous, professionnels, essayons de comprendre ces éléments pour les mettre en œuvre. Le "Behaviour all finance" est important pour nous car nous avons beaucoup de présupposés sur le comportement humain et maintenant nous avons les moyens, les capteurs, la traçabilité de toutes les opérations qui permettent de mieux comprendre votre comportement. Le deuxième thème dans lequel il y a un travail vraiment intéressant à développer est tout ce qui relève du contrôle stochastique qui a été évoqué plusieurs fois : on y retrouve les systèmes dynamiques dans le temps avec toute une série de frottements. En finance les frottements interviennent à chaque fois que l'on fait une transaction et ils représentent les coûts de transaction ; ça paraît faible, mais étant donné le nombre considérable de transactions il ne reste pratiquement plus de fonds !

Pour terminer, en conclusion, je dirai que les financiers ont essayé d'organiser un peu des ponts, ces ponts existent mais il faut les rendre plus efficaces et plus nombreux et, dans le domaine des ponts que nous essayons de construire avec les "académiques" on a créé un institut : "L'Institut Europlace de Finance" qui vient de se développer et qui finance de la recherche sur financement privé, en orientant la recherche vers nos préoccupations ; il ne finance pas la part la plus importante de la recherche, il finance la petite partie d'incitation qui fait qu'on

s'intéresse à ce sujet, c'est une des façons de travailler en coopération.

M.-O. M. : Je vais passer la parole à Michel Théra.

M. T. : Je crois que, pour conclure cette table ronde très intéressante, je vais laisser la parole à Monsieur Philippe Braidy, directeur de cabinet de Madame la Ministre Claudie Haigneré. Il n'a pas voulu venir à la table avec les intervenants, mais je puis vous assurer qu'il a écouté les discussions avec gravité.

Philippe Braidy : Je ne voulais pas venir à cette réunion en tant que directeur de cabinet mais on m'a demandé de dire quelques mots. Je suis venu en tant que passionné de mathématiques. Malheureusement il y a bien longtemps comme étudiant il y a une vingtaine d'années, poussé par l'envie de partager avec tous ceux qui participent à cette discipline, je suis venu échanger et vous écouter. Je dois avouer que je n'ai pas été déçu, j'étais venu apprendre et en une heure j'ai beaucoup appris. Je peux peut-être joindre ma petite expérience à que j'ai entendu dire par certains intervenants.

Effectivement lorsque j'étais étudiant, j'ai dévoré les livres de mathématiques avec passion, je voulais probablement en faire ma carrière, je l'ai ratée car j'ai fini dans la finance et maintenant dans un cabinet ministériel ! Je dois dire que j'ai retrouvé certaines de mes expériences et que j'ai ressenti certaines frustrations : quand on quitte l'école on aspire aux hautes sphères des mathématiques et quand on arrive dans le monde de l'industrie et des entreprises on a une impression de rétrécissement du champ des applications et des domaines sur lesquels on travaille. Mais j'ai retrouvé un peu plus tard, notamment dans la finance, des horizons nouveaux que je ne connaissais pas et où les mathématiques, à un très haut niveau, pouvaient conduire à des résultats assez formidables en terme d'applications. J'ai retrouvé une situation analogue au CEA où j'ai rencontré des gens qui, dans le domaine des applications militaires, travaillaient sur la simulation numérique ; je l'ai vu de loin mais j'ai entendu beaucoup de choses intéressantes. Dans mon passage au CNES, j'ai vu que tout ce qui est thermodynamique, codes de calcul, moteurs d'Ariane, domaines assez compliqués mais donnant lieu à des développements mathématiques. La qualité des données au-delà de la modélisation qui, lorsque j'avais 20 ans, me semblait une vision un peu rétrécie des mathématiques, conduit en permanence à de nouveaux problèmes qu'il faut résoudre. J'ai retrouvé ces expériences ailleurs ; il est vrai que dans mes fonctions j'ai plus souvent utilisé la règle de trois que l'herméticité des mathématiques que je ressens.

Malgré les études scientifiques que j'ai pu faire, en vous écoutant, j'avais tout de même envie de vous poser une question qui va me placer plus du côté de la salle que de la tribune. Je crois que vous avez essayé de poser des problèmes mais vous avez aussi essayé d'esquisser des solutions. L'échange c'est bien, mais je me demande si les industriels, après des dizaines d'années passées dans leur monde, arrivent à imaginer ce que les mathématiciens de haut niveau peuvent encore éventuellement leur fournir et si les mathématiciens de haut niveau, spécialisés dans leur branche, arrivent effectivement, même avec des échanges nourris, à

réaliser les nouveaux champs d'application des mathématiques. Je ne sais pas la forme à donner à ces échanges, mais la réunion d'aujourd'hui est très riche et il est nécessaire qu'il y ait une imbrication forte et c'est le sentiment que j'en retire pour qu'on réussisse une fertilisation croisée des deux domaines. Je n'ai évidemment pas de solution, j'ai retrouvé, comme directeur de cabinet, un raccourci de tous les problèmes scientifiques de ce pays, problèmes qu'il faut traiter : la pluridisciplinarité qu'il faut préserver pour qu'émergent des solutions scientifiques, le cloisonnement qu'on ressent en tant qu'étudiant entre la discipline d'étude et la nécessaire pluridisciplinarité, l'articulation recherche fondamentale recherche appliquée. Madame Haigneré est très soucieuse de préserver ce socle de recherche fondamentale que l'on veut nous retirer pour l'orienter vers une recherche exclusivement finalisée : la réalité est entre les deux. Il faut la richesse de la recherche fondamentale, car on ne peut pas toujours trouver ; on doit définir au départ ce que l'on veut trouver, avoir des buts.

Je vous remercie car, sorti de mon bureau de la rue Descartes, j'ai appris en une heure plus qu'en un mois et demi, depuis mon arrivée à ce poste de directeur de cabinet.



FIG. 1 – Table ronde “*Le rôle des Mathématiques dans l’industrie et les services*”,
18 septembre 2003



L'INRIA, un institut de recherche au cœur de la société de l'information

L'INRIA, institut national de recherche en informatique et en automatique, placé sous la double tutelle des ministères de la recherche et de l'industrie, a pour vocation d'entreprendre des recherches fondamentales et appliquées dans les domaines des sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC). L'institut assure également un fort transfert technologique en accordant une grande attention à la formation par la recherche, à la diffusion de l'information scientifique et technique, à la valorisation, à l'expertise et à la participation à des programmes internationaux. Jouant un rôle fédérateur au sein de la communauté scientifique de son domaine et au contact des acteurs industriels, l'INRIA est un acteur majeur dans le développement des STIC en France.

L'INRIA accueille dans ses six unités de recherche situées à Rocquencourt, Rennes, Sophia Antipolis, Grenoble et Nancy, Lille-Bordeaux-Saclay et sur d'autres sites à Paris, Marseille, Lyon et Metz, 3000 personnes, dont 2500 scientifiques, issus d'organismes partenaires de l'INRIA (universités, grandes écoles, CNRS), qui travaillent dans plus de 100 "projets" (ou équipes) de recherche communs.

Un grand nombre de chercheurs de l'INRIA sont également enseignants et leurs étudiants (environ 700) préparent leur thèse dans le cadre des projets de recherche de l'INRIA.

L'INRIA développe de nombreux partenariats avec le monde industriel et favorise le transfert et la création d'entreprises (60 sociétés) dans le domaine des STIC, notamment au travers de sa filiale INRIA-Transfert, promoteur de 4 fonds d'amorçage I-Source 1 et 2 dans le domaine des technologies de l'information et de la communication, C-Source (multimédia) et T-Source (télécommunications). L'INRIA est actif au sein d'instances de normalisation comme l'IETF, l'ISO ou le W3C dont il a été le pilote européen de 1995 à fin 2002. Enfin l'institut entretient d'importantes relations internationales : en Europe, l'INRIA est fortement impliqué dans ERCIM, consortium qui regroupe 16 organismes de recherche et

participe à 100 projets européens. À l'international, l'institut collabore avec de nombreuses institutions scientifiques (laboratoires de recherche conjoints à Moscou, Pékin, Mexico, etc, "équipes de recherche associées", programmes de formation et d'accueil)

Le budget est de 120 Meuros HT dont 1/4 de ressources propres, provenant de contrats de recherche et de produits de valorisation. Au cours des années 2000-2003, dans le cadre de son contrat quadriennal, les moyens de l'institut ont été augmentés de près de 50 %.

La stratégie de l'institut repose sur la combinaison étroite de l'excellence scientifique et du transfert technologique. L'objectif essentiel de l'INRIA pour les années 2003-2007 est de réaliser des percées scientifiques et technologiques du meilleur niveau mondial dans le cadre de sept grands défis prioritaires :

- Concevoir et maîtriser les futures infrastructures des réseaux et des services de communication
- Développer le traitement des informations et données multimédia
- Garantir la fiabilité et la sécurité des systèmes à logiciel prépondérant
- Coupler modèles et données pour simuler et contrôler les systèmes complexes
- Combiner simulation, visualisation et interaction
- Modéliser le vivant
- Intégrer pleinement les STIC dans les technologies médicales

Pour en savoir plus : [http ://www.inria.fr](http://www.inria.fr)

Réflexion sur les logiciels :
valorisation et diffusion de logiciels,
les grands challenges applicatifs

9 octobre 2003

INRIA Rocquencourt, le Chesnay Cedex

journée organisée par

C. Saguez (École Centrale de Paris) et F. Bonnans (INRIA-Rocquencourt)

Dans le cadre des manifestations pour ses 20 ans, la SMAI (Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles) a organisé, avec l'INRIA-Rocquencourt, une journée consacrée à la réflexion sur les logiciels.

En effet les aspects logiciels sont la brique essentielle pour la promotion, la diffusion et la valorisation des travaux de recherches en Mathématiques Appliquées. Deux thèmes ont été développés. Le premier porte sur la valorisation et la diffusion des logiciels, et en particulier le développement des logiciels libres, dans différents domaines des mathématiques impliquant des calculs intensifs.

Le phénomène logiciels libres est un point majeur actuellement avec notamment des logiciels tels que LINUX ou APACHE. Au cours de cette première partie, G. Kahn, Directeur scientifique de l'INRIA, a exposé les grands enjeux associés et la politique mise en oeuvre par l'INRIA dans ce cadre. Ensuite trois exemples importants ont été présentés ; la plateforme RNTL-SALOME par M. Rochon (Open Cascade), le logiciel ASTER par F. Waeckel (EDF) et le logiciel SCILAB par C. Gomez (INRIA).

L'après-midi a été consacrée à la présentation de plusieurs grands challenges applicatifs impliquant des calculs intensifs.

F. Rechenmann (INRIA) a exposé les enjeux de la modélisation et de l'analyse des données génomiques et post-génomiques.

P. Leca (CEA) a présenté les importants développements en matière de logiciels scientifiques réalisés par le CEA dans le cadre du programme simulation.

J.C. André (CERFACS) a fait le point sur les travaux vers un système international pour la modélisation du système Terre : les projets PRISM et ESMF.

G. Zerah (CEA) a développé les grands challenges en simulation des matériaux.

Pour conclure cette intéressante journée, P. Caseau a présenté ses réflexions personnelles sur ce secteur essentiel des mathématiques appliquées et les premières conclusions des travaux de l'Académie des Technologies dans ce domaine.

SALOME : Plate-forme logicielle générique pour la Simulation Numérique

Thierry Nkaoua
Directeur Général OPEN CASCADE

L'industrie ayant clairement identifié la simulation numérique comme un axe fort d'amélioration des cycles de conception, il devient indispensable de mettre à sa disposition des outils de simulation couplés, intégrés, multi-physiques ou multi-échelles, et faisant coopérer différents outils comme CAO, maillage, données, calculs ou encore visualisation.

Il est très fréquent qu'au sein d'une même entreprise, chacun des métiers faisant appel à la Simulation Numérique ait développé des pré ou post traitements spécifiques mais aux fonctionnalités similaires, ou encore ait choisi des CAO différentes parce que adaptées à des besoins différents. Lorsque voient le jour des besoins de couplages ou d'interaction entre ces différents systèmes, apparaissent les "moulinettes" d'échange de données ou de format, des outils spécifiques de couplage, etc., outils qui deviennent eux-mêmes des produits à part entière dont la maintenance et les évolutions sont la plupart du temps lourdes et coûteuses, parce que devant suivre les évolutions indépendantes des systèmes qu'ils font communiquer. Avec deux ou trois métiers ou codes, ce mode de fonctionnement est encore viable, au-delà, le nombre d'outils de communication croit au-delà du raisonnable.

Développée par la société OPEN CASCADE (<http://www.opencascade.com>), SALOME est une plate-forme d'intégration pour la Simulation Numérique. SALOME permet de produire des plate-formes de modélisation et calcul. SALOME fournit en quelque sorte une "factorisation" de différents outils et services pouvant servir à différents codes de calcul :

- Couplage et interaction CAO-Maillage-Calcul
- Visualisation tout au long du processus de modélisation-calcul
- Supervision, pilotage et couplage de codes de calcul
- Optimisation et itérations entre tous ces éléments

SALOME permet différents niveaux d'intégration. L'intégration la plus simple consiste à fournir pré et post traitements à un code de calcul. Un usage plus poussé introduira les "règles et normes du métier", intégrera des outils propriétaires ou publics (algorithmes de maillage, solveurs, etc.) et s'intégrera au système d'information existant. Enfin, une utilisation complète pourra, en plus des éléments précédents, fédérer plusieurs outils de calcul, proposer un format unique de données, et finalement uniformisera l'ensemble des outils disponibles dans un département ou une société.

SALOME supporte tous les standards d'échanges de données CAO (STEP, IGES, STL, VRML, etc.) et assure la compatibilité avec les "composants interfaces" du

marché pour CATIA, EUCLID, PARASOLID, ACIS, etc. Toutes ces fonctions permettent de reprendre et de modifier une CAO existante. Mais SALOME permet aussi d'assigner des propriétés à une CAO et d'associer CAO et maillage.

La fonction de Supervision de SALOME permet non seulement d'automatiser des cas de calculs et de construire des couplages multi-physiques ou multi-échelles mais aussi de mettre en œuvre des processus d'optimisation à travers toute la chaîne de composants de SALOME CAO, Maillage, Données, Calcul, Visualisation des résultats. SALOME est diffusé en Open Source, licence L-GPL. Cela autorise à diffuser les codes intégrés avec SALOME sous quelque forme que ce soit, payante ou pas, Open Source ou non.

La première phase de développement de SALOME a eu lieu entre 2000 et 2003 dans le cadre d'un projet de R&D labellisé par le Réseau National des Technologies Logicielles et soutenu par le Ministère de l'Industrie. Ce projet a réuni 9 partenaires : CEA, EDF, EADS, PRINCIPIA, OPEN CASCADE, INPG/LEG, BUREAU VERITAS, LIP6 et CEDRAT. Une deuxième phase de R&D a démarré en 2003, toujours dans le cadre RNTL et réunit à présent 22 partenaires. Entre 2002 et 2003, CEA, EDF et OPEN CASCADE ont investi dans l'industrialisation de SALOME et ont reversé tous ces travaux en Open Source. Cette version industrialisée a été publiée en Janvier 2004 (<http://www.salome-platform.org>). Elle a servi au CEA, ANDRA et EDF pour développer la plate-forme de calcul ALLIANCES dans le cadre de la loi Bataille sur les déchets nucléaires.

Le mode de développement de SALOME inaugure d'un nouveau modèle de production de logiciels : un regroupement d'acteurs du monde industriel et de la recherche cofinance une R&D de plus en plus coûteuse, mais indispensable à leurs attentes, tandis que les revenus proviennent, non plus de licences du produit de base, mais à la fois de services rendus autour de ce produit et de licences des produits intégrés.



Une expérience de diffusion en logiciel libre à EDF R&D : la diffusion du *Code_Aster*

F. Waeckel
EDF

1. Introduction

La diffusion de logiciel libre concerne, le plus souvent, les "technologies logicielles" [systèmes d'exploitation, langages et bibliothèques] utilisées pour développer ou faire fonctionner d'autres logiciels que l'on qualifiera d'applicatifs. Elle concerne parfois des applicatifs très génériques [suites bureautiques, systèmes de gestion de base de données] mais très rarement jusqu'ici des logiciels applicatifs "disciplinaires" tels que les codes de calcul scientifiques par exemple.

De même, elle émane le plus souvent de structures universitaires ou de professionnels de l'informatique (constructeurs, éditeurs, ...) mais assez rarement de grands groupes pour lesquels le développement logiciel ne constitue pas l'activité principale.

Le présent article expose donc, au travers du choix d'EDF R&D de diffuser librement, depuis fin 2001, l'un de ses logiciels scientifiques (*Code_Aster*), une expérience relativement originale à ce jour.

Pour mieux appréhender la logique de cette décision, on rappelle d'abord quelques éléments de contexte sur la place de l'activité concernée : la R&D en mécanique des structures, ainsi que les motivations qui ont conduit EDF R&D à être développeur de son propre logiciel dans ce domaine. On présente ensuite les motivations associées à la décision de diffusion externe de ce logiciel et les raisons du choix, in fine, d'une licence "open source". Enfin, on présente la démarche de mise en libre de *Code_Aster* en soulignant quelques aspects juridiques et de management ainsi que les modalités pratiques et on conclut par quelques éléments de retour d'expérience deux ans après cette décision.

2. Contexte : place de l'activité concernée : la R&D en mécanique des structures

Pour bien appréhender le contexte dans lequel EDF R&D a choisi de diffuser *Code_Aster* en logiciel libre, il est important de rappeler qu'EDF est avant tout, en tant que producteur (voire transporteur et distributeur) d'énergie électrique, un **exploitant** de matériels et ouvrages mécaniques (centrales nucléaires et thermiques, barrages, pylônes, postes et lignes). EDF est, parfois, co-concepteur mais jamais jusqu'ici fabricant de matériels ou ouvrages mécaniques.

Par ailleurs, pour l'essentiel, l'activité de R&D en mécanique des structures concerne les ouvrages de production nucléaires auxquels deux spécificités fortes sont associées.

D'une part, EDF est, en tant qu'exploitant, responsable de l'exploitation sûre de ses ouvrages vis-à-vis de l'Autorité de Sûreté, seule habilitée à en autoriser le fonctionnement. Il s'en suit que tant la conception que les éventuelles modifications de nos centrales doivent reposer sur des référentiels méthodologiques et des outils validés, éprouvés et approuvés par l'Autorité de Sûreté. Le rôle joué par une activité de R&D dans ce cadre n'est donc pas identique au cas d'une entreprise manufacturière classique sollicitant sa R&D à des fins concurrentielles de conception ou d'optimisation de produits ou de couples produits-procédés.

La seconde spécificité liée au contexte nucléaire (que l'on retrouve également pour les barrages et les lignes électriques) réside dans la durée de vie des ouvrages concernés (a minima trente ans). Ainsi, l'activité de R&D de mécanique des structures concerne pour une très grande part, la justification de la bonne tenue (en terme de sûreté) de ces ouvrages afin d'en optimiser la valeur productive au travers de leur durée de vie globale et de leur éventuelles opérations de maintenance.

Ainsi, la R&D intervient le plus souvent, non pas à l'amont de la conception mais à l'aval et essentiellement afin de comprendre des événements non prévus ou pris en compte à la conception, pour quantifier, en cas d'aléas, des marges vis-à-vis des études de conception et pour justifier de l'utilisation en l'état ou apprécier au mieux l'éventuelle nécessité de réparation ou remplacement de matériels.

3. Contexte : pourquoi et comment EDF R&D développe en propre certains logiciels

Initié au cours des années soixante dix, le recours à la modélisation et la simulation numérique a atteint au cours des années quatre-vingt une certaine maturité en faisant une activité à part entière, notamment au niveau des structures de R&D. C'est ainsi que sur avis de son Conseil Scientifique, EDF R&D a décidé en 1988 d'engager la réalisation en propre de *Code_Aster* : logiciel de calcul par la méthode des éléments finis en mécanique des structures. Les principales raisons motivant ce choix étaient et demeurent :

- la volonté de maîtrise des modélisations numériques de nos ouvrages afin de pouvoir porter un avis critique sur les études constructeurs ;
- la volonté de capitalisation des travaux de R&D dans un code unique afin de mutualiser les coûts de développement entre différents domaines métiers (tenue de la cuve et des organes principaux du circuit primaire, soudage, séisme, machines tournantes, génie civil, ...) et de participer à une bonne gestion des connaissances et compétences sur le long terme ;
- la volonté de permettre un transfert rapide des modèles mis au point par la R&D vers l'ingénierie et ce dans un souci d'indépendance vis-à-vis d'un ou plusieurs éditeurs de logiciels ;
- la capacité, enfin, de pouvoir construire des solutions métiers intégrées (schémas de calcul prédéfinis et connexions à des bases de données de matériaux, géométries, chargements, ...) permettant de concilier réactivité et productivité des études et cohérence des modélisations employées.

Engagé début 1989, le développement de *Code_Aster* a été organisé pour ses trois premières versions et jusqu'en 1996, en mode projet avec une équipe en charge de la réalisation d'un cahier des charges prédéfini. A compter de cette date, compte tenu de l'ampleur prise par ce projet, un nouveau mode d'organisation en réseau, qui s'apparente au mode de développement des logiciels libres, a été mis en place. Il s'appuie :

- sur une équipe centrale ; responsable de la cohérence des travaux menés au sein de la plate-forme de développement et des développements à caractères génériques mais également de la version en exploitation au sein des différentes directions d'EDF (R&D, Ingénierie, ...) et de leurs sous traitants ;
- ainsi que sur une quinzaine de projets applicatifs qui, dans le cadre de leur travaux de R&D viennent développer et capitaliser dans le code de nouvelles possibilités de modélisation.

Ce mode de développement s'accompagne par ailleurs de plusieurs caractéristiques également communes au développement de logiciels libres :

- la mise à disposition permanente à l'ensemble de la communauté des contributeurs au développement du code (~ 60 personnes par version) de l'ensemble des sources du logiciel (de sa documentation) et des procédures de restitution des développements effectués ;
- l'absence de cahier des charges et plus généralement de cycle en V ; le versionnement du logiciel ne pouvant être qu'asynchrone vis-à-vis du phasage des différents projets contributeurs à son développement ;
- et enfin une forte proportion (environ un tiers) des utilisateurs finaux du logiciel qui sont également, à différents degrés d'engagement, contributeurs de son développement.

On pourra visiter le site www.code-aster.org pour une présentation détaillée des principales fonctionnalités et exemples d'utilisation de *Code_Aster*. , et on donne uniquement ci-dessous quelques chiffres caractérisant l'ampleur de ce projet :

- 1 000 000 lignes de sources ;
- 1400 tests gérés en configuration (1 000 000 lignes de commandes) ;
- 10 000 pages de documentation d'utilisation, référence, validation et informatique (en ligne) ;
- 15 années de développement et d'utilisation interne à EDF ;
- 20 développeurs permanents ; 50 contributeurs par version ;
- 40 mises à jours annuelles de la version de développement ;
- une version d'exploitation qualifiée tous les deux ans (corrigée à 6 mois).

4. Les motivations : pourquoi une diffusion externe ?

En 1997, le logiciel ayant atteint une certaine maturité, les possibilités d'une diffusion et valorisation externe ont été étudiées. Les objectifs recherchés étaient la volonté de "contrôle qualité" des développements réalisés, par le jugement externe, ainsi qu'une possible réduction des coûts de maintenance (corrective et évolutive) par l'augmentation du nombre d'utilisateurs et les droits de licence afférents. EDF R&D ne souhaitant pas s'engager en tant qu'éditeur logiciel, trois concession-

naires furent chargés de diffuser la version 4 de *Code_Aster* "sur étagère" durant la période mi 98, mi 2000. Au terme de cette expérience, le bilan fut extrêmement modeste. Les principales raisons analysées furent les suivantes :

- le logiciel était incomplet (absence de pré et post traitement associés à l'offre) pour "séduire" en l'état dans une approche marketing ;
- la "force" du logiciel résidait dans ses capacités d'expertise mais l'implication technique d'EDF et des trois concessionnaires fut insuffisante pour porter cette "différentiation technique" du produit auprès des éventuels clients ;
- le choix de diffuser le code sur "étagère froide" et sans possibilité de développement complémentaire n'était cohérent ni avec les forces ni avec les faiblesses du logiciel. En effet, tant pour pallier le manque d'environnement utilisateur que pour intéresser un marché d'expertise, nécessitant des fonctionnalités très pointues ou spécifiques, la possibilité d'ajouter des développements au logiciel tel que diffusé par EDF était absolument nécessaire, mais non permise dans l'offre diffusée.

C'est pourquoi, l'expérience de diffusion commerciale du code sur étagère froide ne fut pas poursuivie au delà de la version 4 et une nouvelle réflexion sur l'opportunité d'une diffusion externe fut engagée avec les quatre objectifs suivants fixés par la Direction d'EDF R&D :

- accroître la qualité du code en augmentant ses usages ;
- accroître le réservoir de compétences disponibles autour de *Code_Aster*, tant pour nos politiques de partenariats de R&D que pour la qualité des études sous traitées ¹ ;
- ne pas mobiliser (beaucoup) de ressources internes pour cette diffusion et, en particulier, ne pas s'engager dans une logique de croissance en vue d'éventuels succès ;
- ne pas exiger en retour, des bénéfices financiers directs ni un retour sur investissement des efforts consentis pour le développement du logiciel.

Compte tenu de ces objectifs, l'instruction d'une possibilité de diffusion de *Code_Aster* sous licence libre fut engagée fin 1999 et aboutit début 2001 à la décision de principe d'une telle diffusion.

5. Les motivations : des objectifs de valorisation au choix de licence

Pour compléter le paragraphe précédent sur le choix d'une diffusion en logiciel libre, on empruntera aux travaux de Laure Muselli² sur les liens entre les objectifs d'une diffusion externe et le choix de licence associé. En effet, bien qu'ayant été établie pour des acteurs des "technologies logicielles" cette classification ap-

¹Ce point est essentiel dans la mesure où l'absence de diffusion externe conduit, de fait, EDF à être seul à financer le développement de compétence vis-à-vis du code tant dans les organismes de recherche partenaires que chez nos fournisseurs d'études.

²Laure Muselli [Université Paris XIII] : "La licence, un outil stratégique pour les éditeurs de logiciels" dans "Nouveaux modèles économiques, nouvelle économie du logiciel" ; Rapport RNTL, novembre 2002.

porte un éclairage complémentaire sur les objectifs de diffusion externe relatifs à *Code_Aster* et le choix de licence associé. Selon Laure Muselli, les quatre types d'orientation stratégiques associés à une diffusion externe sont :

- **la valorisation patrimoniale** : qui consiste à générer des revenus en échange de droits d'usage et conduit au choix d'une licence "propriétaire" la plus couramment utilisée dans l'édition de logiciels.
- **le contrôle des firmes concurrentes** : dans ce cas, l'objectif est d'asseoir le positionnement de l'entreprise sur son marché en favorisant l'usage de ses produits tout en se protégeant d'éventuelles possibilités de rémunération (pour des tiers) d'innovations apportées au logiciel initial. Cette stratégie conduit généralement à des licences dites hybrides qui présentent certaines caractéristiques des licences libres (pour inciter à l'usage) tout en comportant des clauses restreignant au seul auteur la possibilité de créer des produits dérivés du logiciel initial moyennant redevances. Un exemple de ce couple "stratégie-licence" est fourni par la licence Java de Sun Microsystems.
- **la création de coopération** : dans ce cas, le but recherché est de partager les efforts nécessaires à un processus d'innovation incrémental et cumulatif. Le choix de la licence a alors pour but d'inciter le licencié à utiliser et contribuer aux améliorations du logiciel. Les licences libres sont alors généralement choisies. Pour un éditeur (ou plus exactement l'auteur "vivant" de l'activité logicielle) le retour sur investissement d'une telle démarche réside alors dans la fourniture de prestations d'assistance et d'expertise ainsi que dans le partage de ses propres coûts de R&D dans la mesure où il profitera des améliorations apportées au logiciel par la communauté.
- **l'établissement de standard** : dans ce cas c'est essentiellement l'usage, plus que des contributions au développement, qui sont recherchés. La principale caractéristique des licences associées à ce type de stratégie sera alors un prix faible voire nul quitte à créer un système de licences multiples en fonction du type d'usage ou du profil de l'utilisateur.

Il est clair que concernant *Code_Aster*, c'est de la stratégie de création de coopération que notre propre stratégie de diffusion se rapproche le plus et partant que le choix d'une diffusion sous licence libre apparaît comme cohérent. On peut même ajouter que nos objectifs de diffusion, rappelés ci-dessous, ainsi que la contrainte de ne pas développer une activité tournée vers l'externe, renforcent l'intérêt d'une licence libre dans la mesure où celle-ci rend possible l'émergence de distributeurs de services qui, n'ayant pas à amortir l'investissement relatif au développement du logiciel, pourront développer une activité rentable qui viendra compenser la non présence d'EDF sur ce domaine et permettra de toucher des utilisateurs ayant besoin de service d'accompagnement et que la seule diffusion libre du logiciel ne permettrait pas d'atteindre directement.

En résumé, on retiendra que la finalité et le mode de développement interne de *Code_Aster* ainsi que nos objectifs de diffusion et aussi nos contraintes conduisent à un choix de diffusion sous licence libre qui semble cohérent et sans doute plus pertinent que le choix d'une valorisation patrimoniale au travers d'une licence commerciale classique.

6. Nos objectifs et cibles de diffusion

Objectifs de diffusion :

reconnaissance par l'usage : en créant un réseau plus large d'utilisateurs, le code sera soumis à des épreuves et des comparaisons nouvelles. Les modélisations disponibles et les nouveaux développements seront ainsi mieux "qualifiés" et les défauts identifiés plus rapidement. Les possibilités d'interopérabilité contribueront au partage du savoir-faire des métiers et garantiront une meilleure preuve des modèles.

contributions à l'environnement d'étude et aux applications : l'adaptation d'un code généraliste par éléments finis à des études spécifiques offre un large champ d'expression. Les protocoles d'échange de données, les possibilités du langage de supervision Python, également disponible en logiciel libre et l'architecture objet permettent cet enrichissement. Ces contributions, publiques ou privées, permettront d'augmenter le domaine d'usage du code et de bénéficier de la créativité du réseau.

contributions à de nouvelles modélisations dans *Code_Aster* : à partir de la conception objet et de l'architecture générale du code, plusieurs champs de contributions sont possibles. Diverses méthodologies permettent de nouveaux développements : commande spécifique, nouvel élément fini ou champ de grandeurs, modèle "utilisateur" de comportement ... La méthodologie de non-régression de l'existant à chaque évolution est proposée au réseau pour garantir la cohérence d'ensemble.

Cibles de diffusion :

En proposant un logiciel libre nous permettons à chaque acteur d'évaluer le logiciel à son rythme en supprimant le préalable financier, pour les chercheurs, ou en modifiant l'ordre des critères de choix pour les industriels (évaluer l'intérêt vis-à-vis des possibilités de maîtrise, d'indépendance, ...). Ainsi quatre cibles d'utilisateurs peuvent être identifiés :

les industriels et centres techniques : qui trouveront une structure d'accueil complémentaire pour capitaliser et/ou partager leur efforts de R&D mais aussi pour développer des applications spécifiques nécessitant un code non linéaire ;

les équipes de recherche : qui trouveront une plate-forme de simulation 3D permettant la capitalisation pérenne de leurs travaux de R&D de manière indépendante de telle ou telle solution commerciale ;

les fournisseurs de service : qui pourront proposer des solutions complémentaires de pré ou post traitement, réaliser des applications dédiées à des domaines ou des composants particuliers ainsi que des offres de services accompagnant (formation, assistance technique, maintenance personnalisée, ...);

les formateurs : qui auront accès à un logiciel industriel dans le domaine non linéaire, sans restriction d'emploi et avec l'ensemble de sa documentation théorique et un corpus de tests et exemples significatifs.

7. Les modalités pratiques

La décision de principe étant acquise quant à sa pertinence vis-à-vis de nos objectifs et contrainte, les travaux préparatoires furent engagés. Ils peuvent se résumer en trois catégories : juridiques, organisationnels et de management, techniques et de communication.

Concernant les aspects juridiques, il s'agissait d'une part de vérifier si EDF R&D était habilitée, en regard du principe de spécialité qui limite EDF (en France) dans ses possibilités de diversification ainsi que des règles de droit de la concurrence, à engager la diffusion libre de *Code_Aster*. Sur ces deux points, nos juristes conclurent qu'EDF était légitime à engager la diffusion libre de *Code_Aster*. Par ailleurs, il s'agissait de définir le type de licence libre. Sur ce point, après avoir envisagé de rédiger une licence spécifique et beaucoup échangé avec l'European Free Software Foundation, nous avons opté pour la licence GPL (GNU General Public Licence) qui est la licence utilisée par environ 70% des logiciels libres. On notera que le caractère prétendument viral de la licence GPL (qui s'étend obligatoirement à toutes les évolutions du logiciel initial) ne nous a pas semblé être "dangereux" dans la mesure où *Code_Aster* n'est pas une bibliothèque servant à la construction d'applications plus finalisées mais est déjà un logiciel applicatif et que, d'autre part, la GPL n'impose nullement la gratuité des prestations réalisées et notamment des éventuelles diffusions complémentaires. Ainsi la GPL nous a semblé permettre de concilier la volonté de garantie de l'intégrité des évolutions de *Code_Aster* et la possibilité, à des tiers, d'adapter (et adopter) le code pour leurs besoins ou réaliser des activités rémunératrices.

Concernant les aspects organisationnels et de management, le premier objectif fut d'étudier si la création d'un comité de pilotage, également appelé "core team", réunissant plusieurs acteurs institutionnels intéressés pour s'engager dans la définition des évolutions future de la version libre de *Code_Aster* était possible. Dans ce but quelques contacts avec des groupes industriels ayant recours à des processus de développement internes furent pris. Ils ne permirent pas d'aboutir et on choisit donc d'initier la diffusion libre de *Code_Aster* sur la base de la version EDF du logiciel et avec EDF comme principal animateur de la communauté. Ainsi on notera que le développement de *Code_Aster* ne répond pas exactement au modèle standard d'un logiciel libre dans la mesure où jusqu'ici EDF décide seul des évolutions du code diffusé en libre qui reste (jusqu'ici) une déclinaison de la version du logiciel utilisée par EDF alors que, dans un modèle libre "usuel", le mécanisme devrait être inversé et la version utilisée par EDF décliner de la version libre. On notera pour conclure sur ce point que deux acteurs (DeltaCad, puis un peu plus tard CS) décidèrent de se positionner rapidement sur le marché des services associés à *Code_Aster* libre et d'ouvrir des sites Internet dédiés³.

Le second objectif organisationnel et de management fut plus centré sur l'interne. En effet, dans la perspective de constitution d'un "premier cercle" de contribu-

³www.code-aster-services.com pour DeltaCad et http://dps.c-s.fr/srhtml/aster/aster_accueil_fr.html pour CS.

teurs au développement de la version libre de *Code_Aster*, il était nécessaire de s'assurer que l'équipe de développement actuelle était prête à partager sa responsabilité aujourd'hui exclusive sur le logiciel. Par ailleurs, il s'agissait également d'envisager les modalités selon lesquelles la version EDF "qualifiée nucléaire" de *Code_Aster* pourrait être construite à partir d'une version libre dont le développement ne suivrait pas nécessairement le même processus qualité. Vis-à-vis de certains développeurs un accompagnement sur le bien fondé d'une telle décision fut également nécessaire dans la mesure où la mise à disposition gratuite du logiciel pouvait être considérée comme synonyme d'un manque de juste considération de la valeur de leur travail. Enfin, il était important d'obtenir une adhésion suffisamment forte pour notamment l'animation des forums tout en veillant à éviter un investissement excessif au détriment de notre mission interne. Sur ce point et après deux ans de fonctionnement, on peut noter que l'engagement **personnel** de quelques développeurs aura été essentiel au démarrage de la communauté.

Concernant les aspects techniques et de communication, quelques travaux furent nécessaires à la préparation des sources, des opérations de téléchargements et aux adaptations du site intranet pour une utilisation Internet (niveaux de visibilité différenciés, suivi des téléchargements, ...). Par ailleurs le financement de trois sessions de formation gratuites (à l'utilisation et au développement) pour favoriser les premiers usages fut décidé ainsi que quelques opérations de communications (presse métiers, conférence de presse, numéro spécial du journal du code, ...). Enfin, afin de pallier l'absence de pré et post processeurs intégrés à *Code_Aster*, l'interfaçage avec le logiciel gratuit (désormais également sous licence GPL) Gmsh fut réalisé.

On présente ci-dessous ce qui est diffusé et téléchargeable sur le site www.code-aster.org depuis le 15 octobre 2001 :

- la totalité des sources de la version de développement (mise à jour tous les 6 mois);
- une version exécutable sous linux;
- l'accès aux versions des langages Python et Tcl Tk utilisés par *Code_Aster* ainsi qu'au logiciel d'optimisation de résolution de systèmes linéaires METIS;
- des composants complémentaires à *Code_Aster* :
 - ASTK : Gestionnaire d'étude et de développements privés
 - Efficas : Editeur graphique de fichiers de commande;
 - MED : module d'échanges de données entre codes (utilisés par EDF, CEA et le projet Salomé notamment);
 - Gmsh dans son niveau de version interfacé avec *Code_Aster*;
 - Homard : logiciel d'adaptation de maillage interfacé avec *Code_Aster*;
- l'ensemble de la documentation (10 000 pages), plus de 350 cas test commentés et illustrant les possibilités du code, les comptes rendus de toutes les modifications portées à la version en développement à EDF, l'accès à trois forums thématiques,...

8. Quels résultats après deux années ?

Depuis décembre 2001, trois versions successives de *Code_Aster* ont été proposées au téléchargement. Elles ont toutes été téléchargées dans plus de 500 laboratoires, entreprises ou adresses privées différentes. Quotidiennement, plus de 300 visiteurs hors EDF parcourent le site et plus de 700 internautes se sont identifiés pour avoir accès à la documentation du code. Enfin, plus de 150 utilisateurs ont postés plus 1500 messages sur les forums et plusieurs portages réalisés par la communauté [FreeBSD, Mac OS et Windows disponible sur le site de Delta Cad www.code-aster-services.com].

En octobre 2003, la première journée Aster libre organisée sur le campus de l'UTC a démontré que le premier objectif lié à la diffusion du code en logiciel libre ; l'appropriation par une large communauté d'utilisateur, était en passe d'être gagné : sans être encore structurée en une communauté, il existe une réelle collectivité d'utilisateurs externes, certains possédant une véritable expertise des utilisations du code et la mettant à l'œuvre dans des projets importants, d'autres étudiant l'insertion de *Code_Aster* au sein de processus plus globaux de modélisation : lien avec maillage et visualisation, outils métiers, optimisation et recalage ...

On note également une appropriation intéressante par le secteur de l'enseignement⁴ et par certains laboratoires de recherche qui nous permet déjà d'orienter certaines de nos politiques de partenariats.

En revanche, le marché de prestation reste encore modeste et le défi à relever est désormais celui du développement partagé : trop peu de retours de développements sont aujourd'hui constatés sur le site de *Code_Aster* alors qu'un parcours sur le forum montre à l'évidence que ces développements commencent à exister. Au-delà de ce défi, pointe un autre challenge : faire émerger une "Core Team" pour employer le langage du logiciel libre, c'est à dire un premier cercle d'acteurs organisés, prêt à contribuer et s'impliquer dans les évolutions du logiciel.

⁴Le premier partenariat conclu autour de *Code_Aster* libre relève d'ailleurs de ce domaine. Réunissant EDF R&D, le projet de campus numérique en mécanique, Mecagora et la société Delta-Cad, ce partenariat a pour objectif la réalisation d'un support de formation à la simulation numérique en mécanique avec *Code_Aster* et son interfaçage avec le logiciel de pré et post traitement GiD [issu de l'Université de Barcelone]. Il permettra à l'ensemble des élèves ingénieurs des écoles partenaires du projet Mecagora [Insa, Ensam et Universités de Technologies soit plus de 6000 élèves ingénieurs] d'avoir ainsi accès à *Code_Aster* dans le cadre de leur formation.

Scilab : un enjeu important pour le calcul scientifique

Claude Gomez

INRIA

Claude.Gomez@inria.fr

Historique

Les logiciels de calcul scientifique visent à donner aux ingénieurs un ensemble d'outils de calcul numérique pour mettre au point des programmes de simulation, de commande et d'études dans des domaines très variés.

L'introduction de ces outils, vers 1980, a totalement révolutionné le mode de travail de la recherche et du développement dans ces domaines, à tel point que les chercheurs et les laboratoires d'ingénierie industrielle utilisent quotidiennement ces outils. Ceci a débuté aux États-Unis par le développement dans des laboratoires publics de grandes bibliothèques d'algèbre linéaire et du système Matlab qui fournissait en plus un langage interprété pour les opérations de base de l'algèbre linéaire, addition, produit de matrices etc., avec une syntaxe agréable et adaptée. Le développement d'un outil similaire s'est fait à l'INRIA à la même époque, sur la même base que le Matlab initial et avec les mêmes librairies.

D'abord baptisé Basile et vendu par la société Simulog, le produit INRIA s'est ensuite appelé Scilab en 1990, a été développé par un groupe de chercheurs¹ de l'INRIA et de l'ENPC et a été distribué gratuitement sur Internet avec les sources en 1994. Il correspond à un investissement total de plusieurs centaines d'hommes années (noyau + librairies + boîtes à outils).

Aujourd'hui on peut dire que Matlab, logiciel propriétaire, est le standard du domaine et que Scilab est un logiciel libre comparable.

Le logiciel Scilab

La version actuelle de Scilab est la 2.7 et il tourne sur :

- la plupart des stations de travail UNIX/X Window ;
- GNU/Linux (PC, Mac Os X) ;
- Windows 9X/NT/2000/XP.

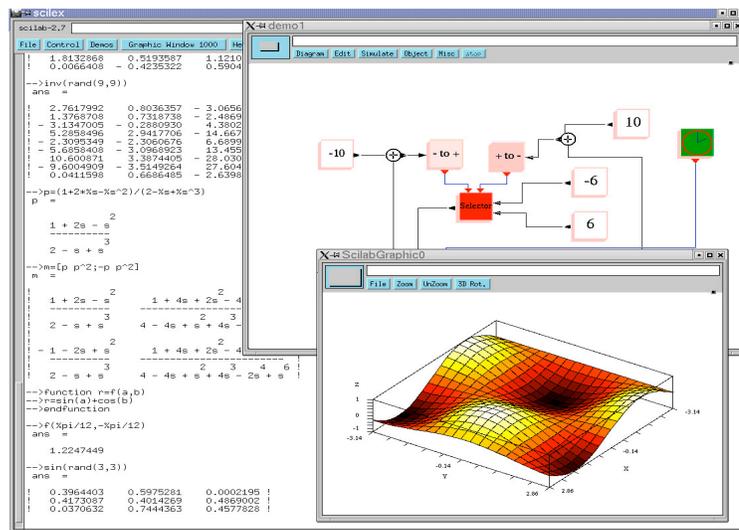
On peut télécharger des versions sources ou binaires à partir du site www.scilab.org ainsi que de la documentation et des informations sur Scilab. Il dispose d'un forum international "comp.soft-sys.math.scilab" où les utilisateurs peuvent échanger idées et problèmes. Il est aussi possible d'interagir avec les développeurs de Scilab à la fois à partir du site Web et en utilisant l'adresse email scilab@inria.fr.

¹5 chercheurs de l'INRIA-Rocquencourt : François Delebecque, Claude Gomez, Maurice Goursat, Ramine Nikoukhah et Serge Steer, et un chercheur du laboratoire CERMICS de l'ENPC, Jean-Philippe Chancelier.

Scilab contient des centaines de fonctions mathématiques avec la possibilité de rajouter interactivement des programmes écrits dans divers langages (FORTRAN, C, C++, JAVA ...) au système. Il possède des structures de données sophistiquées (incluant les listes, les polynômes, les fractions rationnelles, les systèmes linéaires ...), un interpréteur et un langage de programmation de haut niveau. Scilab a été conçu pour être un système ouvert dans lequel l'utilisateur peut définir de nouveaux types de données et des opérations sur ces types de données en surchargeant les opérateurs.

Le logiciel Scilab vient avec un grand nombre de fonctionnalités (boîtes à outils) dans des domaines variés du calcul scientifique :

- Graphique 2-D et 3-D, animation.
- Algèbre linéaire, matrices creuses.
- Polynômes et fractions rationnelles.
- Simulation : solveurs d'EDO (ODEPACK) et de DAE (DASSL).
- Scicos : simulateur bloc-diagramme de systèmes dynamiques hybrides.
- Commande classique, robuste, optimisation LMI.
- Optimisation différentiable et non différentiable.
- Traitement du signal.
- Metanet : graphes et réseaux.
- Scilab parallèle utilisant PVM.
- Statistiques.
- Interfaces avec le calcul formel (Maple, MuPAD).
- Interface TCL/TK.



Il est possible aussi de télécharger à partir du site Web de Scilab un grand nombre de contributions dans des domaines variés.

Pourquoi utiliser Scilab ?

Comme tout logiciel "open source" distribué librement, Scilab permet, en plus d'une facilité d'utilisation sans les contraintes de type "jetons", des développements internes avec la maîtrise complète du logiciel. Il bénéficie d'une large communauté d'utilisateurs. Scilab étant issu du domaine de la recherche, il permet des collaborations avec les milieux académiques plus faciles. Enfin, installer librement Scilab sur sa machine met à sa disposition une super calculette gratuite d'une puissance inégalée.

Le consortium Scilab

Depuis 1994 les téléchargements de Scilab à partir de son site Web se sont multipliés : aujourd'hui c'est environ 15 000 téléchargements par mois venant de plus de 100 pays différents. Plus de 1 300 personnes se sont inscrites sur la liste de diffusion des informations sur Scilab. Il existe des livres en français, en anglais et en chinois sur Scilab. Il est enseigné et utilisé dans des universités du monde entier et il intéresse de plus en plus d'industriels.

En France, Scilab fait partie des logiciels utilisés pour l'épreuve de modélisation de l'oral de l'agrégation de mathématiques. En 2002, avec un financement du ministère de la recherche et de la technologie, un CD-ROM contenant Scilab, CAML et MuPAD et diffusé dans les classes de lycées (secondaire, CPGE, BTS ...) a été réalisé en collaboration avec le CNDP.

À l'étranger, des actions ont été entreprises en Chine où des ateliers annuels ont lieu depuis 2001 et où un concours Scilab a été organisé en 2002, en 2003 et un autre est prévu en 2004. De plus, des sessions de formation à Scilab ont été réalisées dans un certain nombre de pays du monde.

Devant ce succès, afin de faire de Scilab une référence crédible en milieu académique et industriel et à l'international, l'INRIA a décidé de créer le consortium Scilab qui a vu le jour en mai 2003. Ses membres sont actuellement au nombre de 13 : APPEDGE, AXS INGENIERIE, CEA, CNES, CRIL TECHNOLOGY, DASSAULT-AVIATION, EDF, ENPC, ESTEREL TECHNOLOGIES, INRIA, PSA PEUGEOT CITROEN, RENAULT et THALES. Le consortium doit garantir la pérennité de Scilab, animer et fédérer la communauté des contributeurs, assumer le rôle d'architecte de Scilab et fournir des moyens pour son développement. Ce consortium est composé d'un comité de pilotage, d'un conseil scientifique et d'une équipe opérationnelle. Cette équipe existe depuis le début de l'année 2003 sous la forme d'un projet de développement de l'INRIA-Rocquencourt. Elle a pour but d'assurer le développement de base et le suivi qualité de Scilab, de réaliser l'assistance de premier niveau, la valorisation et la promotion de Scilab ainsi que l'animation scientifique.

Les entreprises et les académiques peuvent adhérer au consortium en payant une cotisation annuelle :

- 2 000 euros par an pour les établissements de moins de 50 personnes ;
- 8 000 euros par an pour les établissements qui ont plus de 50 personnes et moins de 500 personnes ;
- 25 000 euros par an pour les établissements de plus de 500 personnes.

Ces cotisations permettent en particulier de faire vivre l'équipe opérationnelle et d'engager de nouveaux membres de l'équipe. Cette équipe comprend actuellement 7 personnes et nous espérons à terme doubler ce nombre.

Noter que l'INRIA s'engage fortement dans cette opération car il fournit la structure juridique du consortium, l'héberge, en réalise le support technique et administratif et enfin fournit 5 personnes dans l'équipe opérationnelle.

En plus des membres qui payent une cotisation, des personnes physiques peuvent adhérer gratuitement au consortium. Pour cela il faut qu'elles aient réalisé une contribution à Scilab qui soit jugée importante et acceptée par le consortium. Tous ces membres ont des représentants aux différentes instances du consortium.

Adhérer au consortium permet :

- d'assurer l'avenir de Scilab, de décider de ses orientations et de faire vivre l'équipe opérationnelle ;
- de partager ses préoccupations dans le domaine du calcul numérique avec d'autres utilisateurs ;
- d'acquérir de l'expérience dans un nouveau modèle économique autour de l'"open source".

Le futur de Scilab

Une des tâches importantes de l'équipe opérationnelle du consortium est de réaliser régulièrement de nouvelles versions de Scilab. En plus de la version courante CVS que l'on peut régulièrement télécharger à partir du site Web de Scilab, sous la forme de code source et bientôt de versions binaires, la prochaine version majeure de Scilab sera disponible en juin 2004 et s'appellera "Scilab 3.0". Entre autres, elle disposera d'un nouveau graphique orienté objet permettant d'accéder directement aux différentes parties d'un tracé et d'en modifier les propriétés, d'une amélioration notable de l'interface homme-machine, surtout pour la version Windows, et d'un convertisseur de code Matlab en code Scilab.

Noter aussi que début décembre 2004 aura lieu à l'INRIA-Rocquencourt la première conférence internationale Scilab.



La bioinformatique - Modélisation et analyse des données génomiques et post-génomiques

François Rechenmann
INRIA Rhône-Alpes

www.inrialpes.fr/helix

Les récents progrès des techniques expérimentales d'exploration des organismes vivants, aux niveaux cellulaires et moléculaires, sont à l'origine d'un flux croissant de données qu'il convient de gérer et d'analyser afin d'en tirer de nouvelles connaissances biologiques.

La recherche en biologie ne peut ainsi plus se concevoir sans le recours aux méthodes informatiques, à travers des logiciels adaptés [1].

L'annotation des génomes

Les séquenceurs automatiques ont permis de déterminer la séquence complète de près de 150 génomes de bactéries (chacun de ces "textes" comporte de l'ordre de 10^6 "lettres"), mais aussi d'organismes eucaryotes, tels que la mouche *D. melanogaster* ou la plante *A. thaliana*, et récemment des génomes de la souris et de l'Homme (de l'ordre de 10^9 "lettres"). Depuis la fin des années 70, ces séquences génomiques, d'abord partielles, puis complètes, sont gérées au sein de bases spécialisées. Ainsi, dans sa version de décembre 2003, la base GenBank rassemble 30.10^6 séquences, correspondant à 36.10^9 nucléotides. Toutes les séquences n'apparaissent cependant pas dans ces bases publiques, accessibles *via* Internet.

Le texte une fois connu, il s'agit de l'interpréter c'est-à-dire d'identifier les régions biologiquement significatives au premier rang desquelles figurent les gènes, qui contiennent l'information nécessaire à la synthèse des protéines : c'est la phase d'annotation du texte génomique [2].

S'il est relativement simple d'identifier les gènes dans un génome bactérien, il n'en est pas de même dans un génome eucaryote. En effet, les gènes de ces derniers sont espacés par de longues séquences non codantes, c'est-à-dire qui ne contiennent pas l'information nécessaire à la synthèse de protéines. Ainsi, moins de 3% du génome humain est codant. De plus, un gène eucaryote est lui-même constitué d'une alternance de séquences codantes, les exons, et de séquences non-codantes, les introns. Identifier un gène eucaryote suppose donc, d'une part de détecter son origine et sa fin, d'autre part de déterminer sa structure précise en exons et introns. Pour obtenir ces résultats, il est actuellement nécessaire de recourir à plusieurs méthodes complémentaires : recherche des motifs associés aux débuts et fins de gène, utilisation de modèles de Markov pour distinguer les régions codantes des non-codantes, recherche des motifs associés aux jonctions intron-exon, etc.

Au sein de la plate-forme de génomique exploratoire GenoStar [3], le module GenoAnnot offre au biologiste plusieurs méthodes de recherche des régions codantes. Une interface spécialisée lui permet d'étudier visuellement la concordance de leurs prédictions.

La détermination de la fonction des produits des gènes

À partir de la séquence d'un gène, *via* le code génétique, il est immédiat de calculer la séquence des protéines correspondantes. Mais la connaissance de la séquence des acides aminés qui composent une protéine ne donne pas sa fonction, son rôle dans l'organisme. Il n'existe aucun moyen systématique et fiable de prédire cette fonction à partir de la séquence. Les démarches actuelles procèdent essentiellement par similitude avec des protéines dont la fonction est connue : si une protéine donnée possède une séquence similaire à une protéine de fonction connue, la biologiste aura tendance à lui attribuer cette même fonction. Les algorithmes de comparaison de séquences constituent de ce fait donc un chapitre particulièrement important de la bioinformatique. La taille des séquences et leur nombre dans les bases de données sont telles qu'il faut en pratique recourir à des heuristiques de comparaison pour que les temps de confrontation d'une séquence à une base restent raisonnables.

Les limites de cette démarche de détermination des fonctions des protéines apparaissent rapidement. La qualité de la prédiction est directement fonction de la qualité des fonctions affectées aux protéines de la base consultée et le risque de propagation d'erreurs est important. Aussi les biologistes cherchent-ils à multiplier les critères utilisables pour rassembler des protéines susceptibles de posséder, du fait de leurs similarités physico-chimiques, des fonctions semblables. Cette démarche peut largement bénéficier d'outils informatiques. Ainsi, en offrant au biologiste des facilités de navigation dans un réseau reliant des données hétérogènes, le module GenoLink [4] de la plate-forme GenoStar permet d'accumuler des indices sur la fonction des protéines.

La modélisation des réseaux d'interactions génétiques

La synthèse des protéines est régulée, en réponse aux besoins de la cellule. Les mécanismes de régulation sont multiples et s'inscrivent dans les différentes étapes de la synthèse protéique. Ainsi, la transcription d'un gène bactérien peut-elle être activée, ou au contraire inhibée, par la fixation d'une protéine qui se lie spécifiquement sur une région dite "régulatrice" située en amont de la région codante. Cette protéine est bien évidemment elle-même le produit d'un gène : gènes et produits de gènes interagissent ainsi au sein de réseaux de régulation complexes [5].

Les "puces à ADN" et autres dispositifs similaires permettent de déterminer si un gène est activé ou non, à un moment donné dans des conditions données, en détectant la présence du produit de la transcription de ce gène en ARN messager.

L'analyse de ces données, dites post- génomiques, contribue ainsi à la détermination de ces réseaux et laisse envisager la construction de modèles rendant compte, par simulation, de la dynamique de l'expression des gènes. L'insuffisance de données numériques conduit au choix de formalismes peu exigeants en termes d'information, et pour leur formulation et pour leur simulation.

Ainsi, le logiciel GNA, "Genetic Network Analyser" [6], permet de formuler un réseau d'interactions génétiques sous la forme d'un système d'équations différentielles linéaires par morceaux. La simulation d'un tel système ne requiert pas la valeur numérique de ses paramètres, mais uniquement la connaissance des inégalités qui les relient (Figure 1).

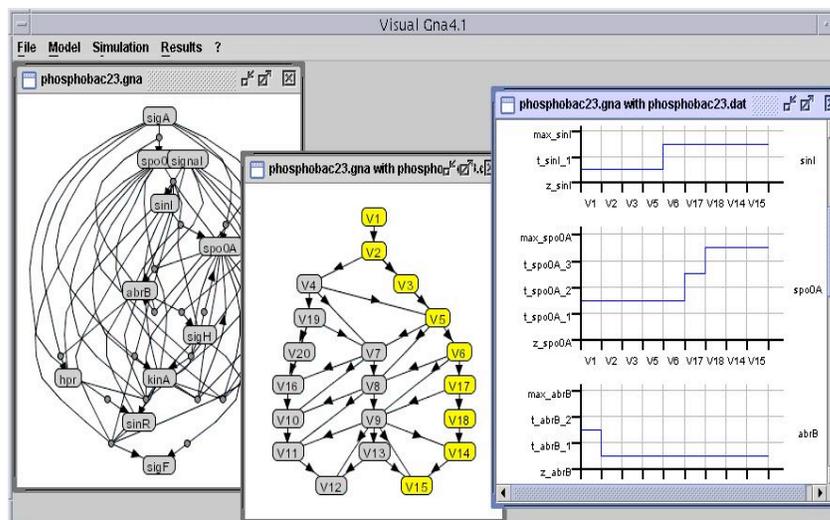


Figure 1 - Le logiciel GNA permet de formuler un modèle dynamique d'un réseau d'interactions génétiques sous la forme d'un système d'équations différentielles linéaires par morceaux. La simulation de ce modèle ne requiert pas la valeur des paramètres. Les trajectoires calculées apparaissent sous la forme d'un graphe d'états successifs.

La génomique comparative

Seuls une vingtaine d'organismes eucaryotes et 150 espèces de bactéries ont vu leur génome séquencé. Or, plus de 1,75 millions d'espèces ont été recensées et le nombre total d'espèces actuelles, s'il n'est pas connu, pourrait être de l'ordre de 100 millions. Ces nombres soulignent l'importance de l'approche comparative

qui consiste à exploiter les données et les connaissances sur une ou plusieurs espèces pour inférer les connaissances manquantes sur une autre [7].

La pertinence de cette démarche dépend des distances phylogénétiques entre les espèces mises en jeu. Deux espèces sont d'autant plus proches que leur premier ancêtre commun est récent. Déterminer ces distances conduit à reconstruire l'arbre dit "phylogénétique" qui rend compte de la filiation des espèces à travers le processus évolutif.

La reconstruction d'arbres phylogénétiques à partir de séquences génomiques des espèces considérées met en œuvre une suite d'algorithmes complexes [8]. Elle suppose en particulier d'obtenir un alignement de ces séquences par des méthodes particulièrement coûteuses en temps et de ce fait le plus souvent implémentées sous la forme d'heuristiques.

Les environnements intégrés d'analyse des données génomiques et post-génomiques

Ces quelques exemples de gestion et d'analyse de données génomiques et post-génomiques illustrent la démarche bioinformatique, parfois dénommée *in silico* car elle vient compléter les démarches expérimentales *in vitro* et *in vivo* des biologistes.

Cette démarche met en œuvre des méthodes et des outils issus de domaines très divers des mathématiques appliquées, de l'informatique et de l'automatique, en les adaptant aux spécificités de la problématique biologique abordée et aux données disponibles. L'apparition de nouvelles problématiques ou de nouveaux dispositifs de production de données conduit également à rechercher des méthodes originales et spécifiques.

Dans tous les cas, les méthodes sont accessibles aux biologistes sous la forme de modules logiciels qui se doivent d'être fiables, efficaces et pertinents, mais aussi faciles à mettre en œuvre et à utiliser. Il est de plus indispensable qu'ils soient interopérables afin qu'ils soient intégrables dans des stratégies d'analyse complexes et spécialisées et que, dans le cas de méthodes concurrentes, leurs résultats soient faciles à comparer et à évaluer.

De ce point de vue, la situation actuelle n'est pas particulièrement favorable. Si bon nombre de méthodes bioinformatiques sont immédiatement accessibles *via* Internet, en particulier au sein du monde académique, leur connexion au sein de tâches d'analyses complexes nécessite l'écriture de nombreux petits programmes (*scripts*) de transformation de formats, écriture qui suppose évidemment la connaissance et la maîtrise de ces formats de données.

De même, les centaines de bases de données biologiques accessibles *via* Internet ne sont pas interopérables [9]. Pire, leur schéma n'est généralement pas disponible ; il s'agit en fait le plus souvent de fichiers plus que de bases au sens propre. Se constituer un jeu de données complet et correct constitue ainsi une tâche préalable à toute analyse.

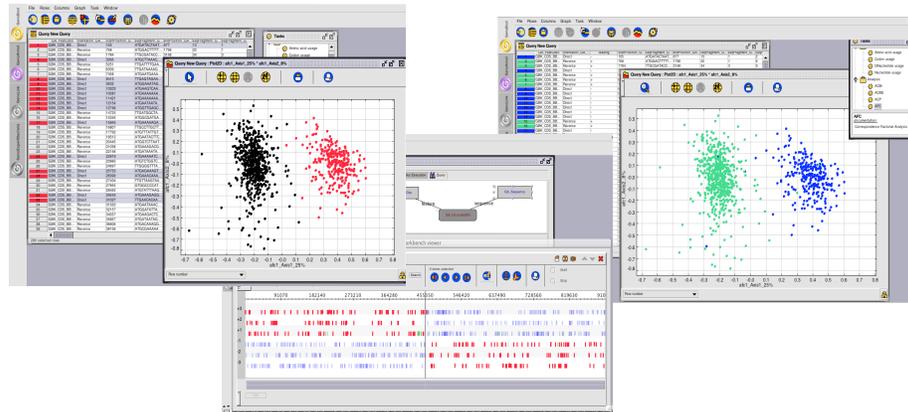


Figure 2 - Exemple d'analyse exploratoire de données génomiques au sein de GenoStar. Les gènes de la bactérie *B. burgdorferi* ont été classés en deux clusters sur la base de l'utilisation du code génétique au sein de leur séquence et grâce aux méthodes de classification offertes par le module GenoBool (écran de gauche). En revenant dans le module GenoAnnot, qui a permis la détermination de la localisation de ces gènes dans le texte génomique, le biologiste peut constater (écran central) que les gènes des deux clusters tendent à être localisés respectivement sur le brin précoce et sur le brin retardé. Il peut alors formuler une hypothèse, la valider en exprimant une requête explicite sur l'ensemble des gènes (écran de droite), puis rechercher une explication biologique à cette corrélation surprenante entre une propriété physico-chimique et l'usage du code (cette corrélation a été mise en évidence en 1998 par James O. McNerney : "Replicational and transcriptional selection on codon usage in *Borrelia burgdorferi*" PNAS 1998 ; 95 : 10698-10703)

Le développement d'environnements intégrés tels que GenoStar vise précisément à permettre aux biologistes de se concentrer sur leur problématique, sans avoir à affronter ces problèmes techniques, grands consommateurs de temps et d'énergie. En offrant l'interopérabilité des données et des méthodes, un tel environnement permet de mener à bien les démarches exploratoires qui sont caractéristiques de la recherche en génomique actuelle (Figure 2).

Références

- [1] Rechenmann F., Gautier C., Donner un sens au génome, La Recherche, juin 2000
- [2] Médigue C., Bocs S., Labarre L., Mathé C., Vallenet D., L'annotation in silico

- des séquences génomiques, *Médecine/Sciences*, 18 :237-250, 2002
(<http://www.medecine-sciences.com/>)
- [3] Durand P., Médigue C., Morgat A., Vandenbrouck Y., Viari A., Rechenmann F., Integration of data and methods for genome analysis. *Curr Opin Drug Discov Devel*, 6(3) :346-52, 2003
- [4] Durand P., Labarre L., Meil A., Divol J.-L., SchŁchter V., Médigue C., Bruley C., Vandenbrouck Y., Viari A., Rechenmann F. et Wojcik J., GenoLink : an exploratory software for functional annotation of genomes, *JOBIM*, juin 10-12, 2002, Saint-Malo (France).
- [5] Thieffry D., de Jong H. Modélisation, analyse et simulation des réseaux génétiques, *Médecine/Sciences*, 18 :492-502, 2002
- [6] de Jong H., Geiselman J., Hernandez C., Page M., Genetic Network Analyzer : Qualitative simulation of genetic regulatory networks, *Bioinformatics*, 19(3) : 336-344, 2003
- [7] Bronner G., Spataro B., Gautier C., Cartographie génomique comparée chez les mammifères, *Médecine/Sciences*, 18 :767-74, 2002
- [8] Lopez P., Casane D., Philippe H., Phylogénie et évolution moléculaires, *Médecine/Sciences*, 18 :1146-54, 2002
- [9] Morgat A., Rechenmann F., Modélisation des données biologiques, *Médecine/Sciences*, 18 :366-74, 2002

Vers un système international pour la modélisation du système Terre : les projets "PRISM" et "ESMF"

Jean Claude André
CERFACS Toulouse

andre@cerfacs.fr, <http://www.cerfacs.fr>

1. Le défi climatique

Même au cours d'une période interglaciaire comme celle qui est actuellement la nôtre, le climat terrestre est par nature fluctuant, comme le montre tant les enregistrements météorologiques sur la période récente (milieu de 19-ème siècle pour les tout premiers) que les reconstitutions à partir d'archives historiques. Si l'on remonte plus avant dans le temps, par exemple en explorant, grâce aux archives climatiques présentes dans les calottes de l'Antarctique et du Groenland, les alternances entre périodes glaciaires et inter-glaciaires, il est patent qu'un lien fort relie le climat (tel que caractérisé par la température) et la composition chimique de l'atmosphère : les périodes chaudes sont associées à de fortes concentrations en gaz carbonique et méthane, tandis que les périodes froides sont associées à de faibles concentrations de ces gaz à effet de serre (GES).

Ces variations naturelles du climat n'ont pourtant concerné que des concentrations de gaz carbonique variant entre 180 ppm¹ et 280 ppm. Or l'utilisation massive des combustibles fossiles (pétrole et charbon pour l'essentiel), qui accompagne le développement de nos sociétés depuis le 18-ème siècle, s'accompagne de forts relâchements de GES dans l'atmosphère, de telle sorte qu'à l'horizon du 21-ème siècle (et des siècles suivants) la concentration atmosphérique en gaz carbonique atteindra des niveaux extrêmement élevés (500 ppm, voire 1000 ppm), niveaux jamais enregistrés au cours de l'évolution climatique des dernières centaines de milliers d'années. Qui plus est, cette modification de la composition chimique de l'atmosphère se déroulera sur une période très brève, se mesurant en quelques décennies, c'est-à-dire très courte à l'échelle des temps d'ajustement climatique.

Dans ces conditions la modélisation numérique est la seule possibilité pour prévoir ce que pourront être les conditions climatiques du futur.

2. La modélisation climatique

Les travaux actuellement en cours dans de nombreux laboratoires mondiaux prédisent tous qu'en réponse à l'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre, la température moyenne de la planète augmentera de

¹Parties par million

plusieurs degrés. Le GIEC² résume ces travaux en présentant une fourchette pour un réchauffement moyen de la planète à la fin du siècle compris entre 1,5⁰ et 6⁰. Il est très important de remarquer que la moitié de cette marge provient des incertitudes affectant actuellement les modèles climatiques quand on suppose que la composition chimique de l'atmosphère est connue, tandis que l'autre moitié de cette marge concerne les incertitudes relatives aux scénarios de développement démographique et économique qui sont retenus pour décrire l'évolution de nos sociétés jusqu'à cet horizon, et donc les scénarios d'émission des GES dans l'atmosphère.

Ces simples remarques font apparaître l'absolue nécessité, pour réduire ces incertitudes, de construire des modèles d'évolution du climat qui, *a minima* et dans un premier temps, traitent correctement des interactions nombreuses et multiples entre les divers sous-systèmes physiques impliqués dans ces évolutions : atmosphère, océan, cryosphère, aérosols, surfaces continentales et végétation, rivières et lacs, volcanisme, ... Ceci représente l'enjeu actuel résumé sous la dénomination "Modélisation du système Terre", qui inclus aussi au-delà du seul climat les cycles des composés biogéochimiques (carbone, nutriments, ...). On peut aussi remarquer qu'à terme il va devenir de plus en plus important de coupler les évolutions physiques du système Terre avec des modélisations de l'activité socio-économique, et de représenter de façon réaliste les réactions des sociétés, par exemple en termes de consommation énergétique, et donc d'émissions de GES. Comment y parvenir ?

3. Les stratégies de couplage

Devant une telle complexité s'ouvrent deux perspectives principales.

La première consiste à construire des modèles simplifiés dans lesquels la formidable complexité naturelle est réduite à la prise en compte de ce que l'on imagine être les modes d'interactions les plus importants entre les divers phénomènes et les divers milieux. Si une telle approche peut être tout à fait utile pour fabriquer des scénarios d'évolution possible, elle ne permet en aucun cas de quantifier l'évolution future. Or ce besoin est patent, ne serait-ce que pour fournir les éléments nécessaires pour la définition des stratégies de réduction des émissions de GES (par exemple pour l'application du protocole de Kyoto) et des stratégies d'adaptation au changement climatique.

Il est donc primordial de se tourner vers la seconde perspective, qui consiste quant à elle à s'appuyer sur les spécialistes de chacun des sous-systèmes considérés pour parvenir à une modélisation présentant les meilleures garanties, car obtenue en **couplant** les sous-modèles des divers systèmes constituants. Cette approche, outre le fait qu'elle permet de définir une stratégie de validation convaincante (par validation individuelle de chacun des modules disciplinaires par rapport aux données disponibles dans la discipline considérée), facilite les inter-

²Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques

comparaisons et les échanges de modules entre modèles "globaux". Il n'est par exemple pas inutile de rappeler que changer le modèle d'océan dans un modèle couplé de climat reste encore actuellement une tâche extrêmement lourde pour beaucoup de groupes.

Cette stratégie de couplage, qui permet donc de progresser vers une science de meilleure qualité, rend aussi la vie des scientifiques plus facile et plus productive, en permettant de définir des standards et des interfaces, en leur fournissant des boîtes à outils et des logiciels, et, in fine, en autorisant dans de meilleures conditions une utilisation efficace de calculateurs d'architectures variées

4. Le projet européen de couplage PRISM

C'est dans cette perspective que s'est mis en place le projet européen dit "PRISM", financé dans le cadre du 5-ème PCRD³. Son objectif plus spécifique est d'entreprendre une étude pilote d'infrastructure pour la mise en place d'un réseau européen distribué pour la modélisation du système Terre.

Il s'agit dans ce cadre

- de coordonner les efforts européens, en créant un service européen et une infrastructure de gestion pour le développement, la coordination et l'exécution d'un programme à long terme, multi-organismes et d'échelle européenne, pour la simulation du climat et du système Terre ;
- de développer un système européen de modélisation du climat, en assurant la portabilité, l'efficacité et la facilité d'utilisation d'un système basé sur les modèles actuels et des outils logiciels associés, tant pour le diagnostic que pour la visualisation.

Le projet PRISM (Ferraro et al., 2003 ; voir aussi <http://www.prism.enes.org>) est schématiquement représenté à la figure 1, avec les différents modules à coupler pour la mise en place de la modélisation du système Terre, l'outil de couplage étant développé sous la maîtrise du CERFACS à partir de son coupleur précédent, appelé OASIS.

Les équipes participantes à PRISM incluent, sous la responsabilité du coordinateur Guy BRASSEUR (Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hambourg) la quasi-totalité des groupes européens impliqués en modélisation des divers composants du système climatique en Allemagne, Belgique, Danemark, France, Italie, Norvège, Pays-Bas, Royaume-Uni, Suède, Suisse, ainsi que le CEPMMT⁴ (Reading). Sont aussi associés des constructeurs comme NEC Fujitsu, SGI et SUN. Le projet a officiellement démarré le 1er décembre 2001, pour une durée de 3 ans.

Un Groupe de Travail pour la spécification "Système" (SSW ; System Specification Working Group) a été créé, composé des leaders des différentes tâches, qui a coordonné la phase de définition, à laquelle ont participé de nombreux groupes (y compris aux USA et au Japon), et la rédaction de deux documents : - le "REDOC"

³Programme Cadre de Recherche et de Développement de la Commission Européenne

⁴Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme

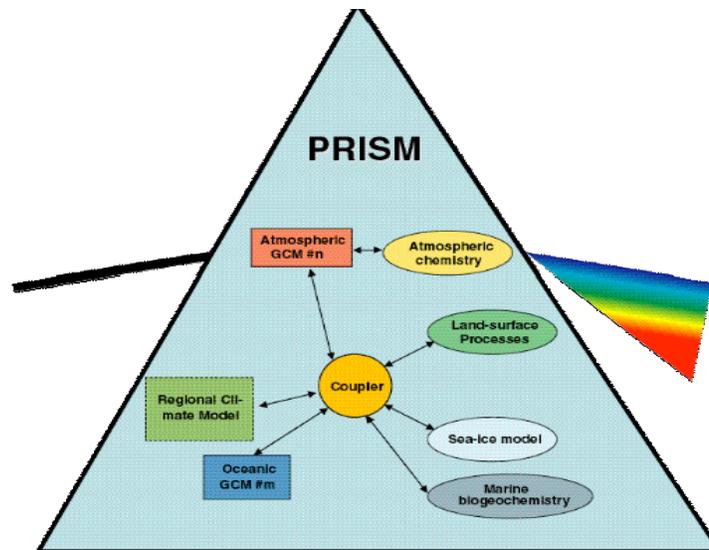


FIG. 1 – Représentation schématique du projet européen PRISM

(REquirements, Design Options and Constraints), expression des demandes des groupes ; -le "ARCDI" (Architecture Choices, Detailed Design and Implementation), expression du meilleur compromis technique qui puisse être atteint à partir des demandes du REDOC.

PRISM souhaite que les outils logiciels qu'il produit soient disponibles largement et librement, sous une diffusion "Open Source". Il reste toutefois encore à vérifier que des conventions et dispositions existant préalablement au démarrage de PRISM ne viennent pas limiter cette possibilité.

Le coupleur PRISM, actuellement basé sur la version Oasis 2.5 du coupleur du CERFACS inclut :

- une bibliothèque de communication CLIM/MPI1 ;
- le format NetCDF pour les grilles et les fichiers de redémarrage ;
- des simplifications Namcouple ;
- une maquette élaborée ("toyclim" model) incluant 3 sous-modèles, des communications parallèles entre la maquette parallèle et OASIS et des communications parallèles directes entre deux sous-modèles ;
- une réécriture partielle en F90.

Les points actuellement en projet relativement aux fonctionnalités à inclure dans le coupleur PRISM concernent :

- le "driver" : doit-il être statique ou dynamique ? Tous les sous-modèles doivent-

ils être lancés initialement (option statique), ou bien peuvent-ils ne l'être dynamiquement qu'au moment où ils sont nécessaires ?

- quelles sont les configurations de couplage qui doivent être supportées ? Pour deux sous- modèles quelconques les options sont (i) soit des exécutables différents travaillant simultanément, (ii) soit des exécutables différents enchaînés de façon séquentielle, (iii) soit un seul exécutable assurant une exécution enchaînée.

Les options techniques discutées pour la réalisation du coupleur concernent quant à elles soit des communications directes entre les sous-modèles, avec une répartition automatique, soit un choix automatique des différents types de communications en fonction des différentes configurations. Par exemple le choix entre une technique d'échange de messages entre différents exécutables, ou entre des copies mémoire pour des composants assemblés au sein d'un même exécutable.

5. Une autre approche : le projet EMSF aux USA et les relations entre PRISM et ESMF

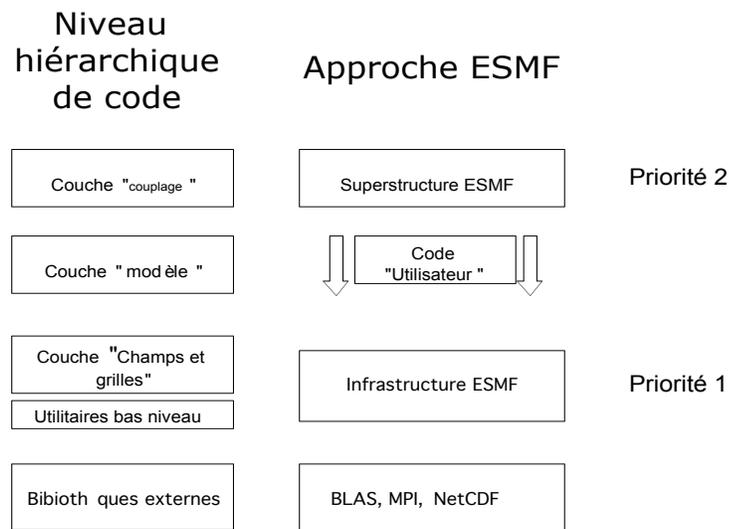


FIG. 2 – Schéma de l'organisation du projet ESMF

Une autre stratégie a été retenue pour structurer les efforts de la communauté climatique aux États-Unis. Dans le projet dit ESMF⁵ (De Luca *et al.*, 2002 ; voir aussi

⁵Earth System Modeling Framework

<http://www.esmf.ucar.edu>), schématiquement représenté à la figure 2, les sous-modèles (cf. la couche dite "couche modèle" et "code utilisateur") sont construits de façon plus efficace à l'aide d'un ensemble d'outils d'infrastructure (grilles, champs, utilitaires de bas niveau, ...) dont la mise en place représente la première priorité. Ce n'est qu'ensuite, lorsque cette première priorité peut être considérée comme satisfaite, que la deuxième priorité, relative aux outils de couplage, que ESMF dénomme sa superstructure, fait l'objet de développements spécifiques.

La figure 3 résume les domaines d'intervention respectifs de PRISM, en environnement des sous-modèles, tant pour le couplage que pour le contexte d'exploitation (incluant le post-traitement), et de ESMF, plus orienté sur la construction des sous-modèles et leur couplage ultérieur.

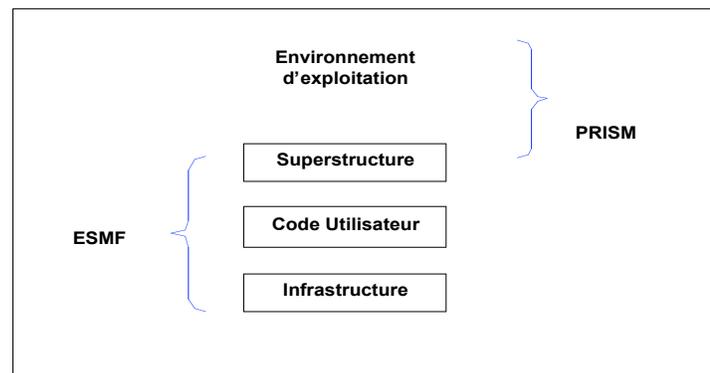


FIG. 3 – *Similitudes et différences entre les approches PRISM et ESMF*

Cette brève description des initiatives européenne (PRISM) et américaine (ESMF) montre à l'évidence que les deux communautés ont adopté des stratégies non seulement assez semblables, mais qu'elles peuvent aussi très facilement converger vers des outils communs. Des discussions sont d'ailleurs en cours pour que les outils de couplage de PRISM soient compatibles avec les outils développés dans la couche de superstructure de ESMF.

A terme assez rapproché, à l'horizon 2005, la grande majorité des modélisateurs du système Terre pourront donc échanger et coupler leurs différents sous-modèles avec une facilité jamais atteinte.

Il restera à organiser au niveau international le suivi et la maintenance et l'évolution de tous ces outils, une tâche dont on sait qu'elle est parfois plus difficile à assurer

que le développement initial.

Remerciements

L'auteur souhaite remercier Sophie VALCKE (CERFACS), Eric GUILYARDI (LSCE), Cecelia DE LUCA (NCAR), et les équipes PRISM et ESMF, auxquels il a emprunté la plus grande partie des éléments inclus dans les sections 4 et 5.

Références

- [1] C. Deluca *et al.*, Introduction to the earth-system modelling framework, in : 4th International Workshop on Next Generation Climate Models for Advanced High Performance Computing Facilities (Boulder, Colorado, March 12-14, 2002).
- [2] R. Ferraro, T. Sato, G. Brasseur, C. Deluca and E. Guilyardi, Modelling the earth system, in : International Geoscience and Remote-Sensing Symposium (2003).

Quelle prédictivité dans le domaine de la simulation numérique des matériaux ?

Gilles Zerah, CEA

Si la modélisation numérique des propriétés des matériaux est encore dans son enfance, comparée aux sciences vénérables que sont par exemple l'hydrodynamique ou la physique atomique, il n'en demeure pas moins qu'elle se développe très rapidement, fortement stimulée par ses avancées récentes.

Un exemple frappant de la perspective actuelle peut être illustré par les récentes discussions ayant entouré la détermination des propriétés de l'hydrogène dans un régime thermodynamique extrême, sous forte pression et à haute température. Expérimentalement, de tels régimes sont atteints en générant des ondes de choc dans l'échantillon. (Une onde de choc est une discontinuité de densité, analogue inversé de la discontinuité séparant les automobiles arrivant des automobiles arrêtées dans un bouchon. C'est un phénomène universel qui se produit dès que de la matière arrive plus vite que l'on peut l'évacuer).

Les expériences sous choc très intense, réalisées auprès du laser Nova de Livermore, puis auprès du laser Omega de Rochester, ont donné des paramètres thermodynamiques de l'hydrogène sous choc en désaccord sensible avec la plupart des théories couramment acceptées [1,2]. Ces théories étaient cependant toutes de caractère semi-empirique : elles utilisaient certains paramètres ajustés sur des données expérimentales obtenues antérieurement dans des domaines moins extrêmes comme c'était la norme dans les années 90.

On en a conclu, assez naturellement, que l'extrapolation de ces ajustements semi-empiriques sortaient de leur domaine de validité et qu'une approche plus fondamentale restituerait les données expérimentales.

À peu près au même moment, les simulations dites *ab initio* deviennent suffisamment performantes, grâce à l'augmentation de la puissance des ordinateurs et à de nombreuses avancées algorithmiques, pour permettre de simuler l'état thermodynamique du choc à l'échelle atomique, en n'ayant recours qu'aux informations élémentaires sur l'échantillon (densité initiale, composition...) et en évitant les ajustements semi-empiriques.

Le résultat est inattendu : il est impossible de réconcilier les simulations et les expériences [3]. Ce désaccord inexpliqué, persiste jusqu'à l'apparition de nouvelles expériences, réalisées cette fois-ci au Sandia National Laboratory, utilisant une technique différente, à la fois plus classique et moins directe, fournisse des points en bien meilleur accord avec les calculs...[4] conduisant à une certaine perplexité la communauté qui s'est penchée sur ce problème, et laissant à l'aventure un certain goût d'inachevé (jusqu'aux prochaines expériences).

En fait, ce qui nous semble le plus frappant, est le renversement opéré, dans la mesure où, le désaccord entre simulation et expérience n'est plus aujourd'hui attribué à un paramètre mal ajusté d'un modèle, qu'il s'agirait de corriger, mais le signe d'un problème expérimental ou de la présence d'un phénomène microscopique inattendu.

Cette tendance est confirmée par la prédiction (avec une erreur généralement inférieure à 10 % et souvent proche du %) de nombreuses expériences réalisées auprès de réacteurs à neutrons (comme celui de l'Institut Laue Langevin) ou de sources de rayonnement synchrotron comme celle de l'ESRF à Grenoble, conduisant à rechercher des situations expérimentales en fort désaccord avec les prédictions.

On pourrait objecter, à juste titre, que la détermination de l'état thermodynamique d'un fluide "simple" comme l'hydrogène sous choc, représente une prédiction modeste au regard des questions difficiles en sciences des matériaux.

Cependant, on peut faire preuve d'un certain optimisme quant à la possibilité d'étendre le caractère prédictif des simulations réalisées à l'échelle de l'atome même pour des questions moins maîtrisées.

On a coutume de ranger sous le nom de comportement, la réponse d'un matériau à une sollicitation mécanique, et même pour un métal banal, cette réponse est la conséquence d'une combinaison de processus se déroulant sur plusieurs échelles de temps et d'espace.

Ces processus impliquent le mouvement de défauts linéaires, appelés dislocations, qui permettent à un trombone (par exemple) de se déformer sans se fracturer : le mouvement de ces lignes permet le mouvement relatif des atomes qui "glissent" les uns sur les autres lors de ces grandes déformations.

La simulation numérique du mouvement de ces lignes a enregistré de nombreux progrès récemment [5], et il devient possible de retrouver les différents régimes de déformations d'un métal, à l'aide d'un très petit nombre de paramètres ajustables. Ce qui permet d'être optimiste, est que l'information sur l'origine de ces paramètres réside principalement dans les processus à l'échelle atomique qui se déroulent au sein même de la ligne de dislocation, et dont le calcul par simulation à l'échelle atomique est envisageable.

Cependant, la réussite d'une telle approche, même si elle semble assez claire dans son principe, nécessitera de nouveaux développements algorithmiques (permettant entre autres de profiter des nouvelles architectures d'ordinateurs) afin de faire le lien entre le monde discontinu de l'échelle atomique et le monde continu de l'échelle macroscopique.

Remerciements L'auteur remercie de nombreux collègues et en particulier J.P. Ansart, D. Bouche, J. Clerouin et P. Loubeyre pour les discussions au sujet de ce manuscrit.

Références

- [1] L.B. Da Silva et al., Phys. Rev. Lett. 78, 483 (1997)
- [2] P. Celliers et al., Phys. Rev. Lett. 84, 5564 (2000)
- [3] M. D. Knudson et al., Phys. Rev. Lett. 87, 225502 (2001)
- [4] S. Bagnier et al., Phys. Rev E 63, 015301 (2001)
- [5] R. Madec et al., Science, 301, 1879 (2003)

Cérémonie en l'honneur des lauréats des
prix 2003 de l'Académie des sciences
en Informatique et Mathématiques Appliquées

le 28 novembre 2003
à l'Institut Henri Poincaré,

Cette cérémonie a été organisée conjointement par l'INRIA, la SMAI, le CNES, l'Université Paris VI, la DGA et l'Institut Henri Poincaré, sous le haut patronage de l'Académie des sciences et en présence de Claudie Haigneré, ministre déléguée à la recherche et aux nouvelles technologies.

Une série de présentations a été donnée par les récipiendaires des différents prix de l'Académie des Sciences en Informatique et Mathématiques Appliquées attribués en 2003 :

- Jacques Stern (Lauréat du prix Lazare Carnot 2003)
- Roger Temam (Lauréat du prix Jacques-Louis Lions 2003)
- Jean-François Cardoso (Lauréat du prix Michel Monpetit 2003)
- Valérie Perrier (Lauréate du prix Blaise Pascal 2003)
- Laure Saint-Raymond (Lauréate du prix Louis Armand 2003)

Un cocktail clôture la cérémonie.

Prix Lazare Carnot

Le Prix Lazare Carnot, à la croisée de la recherche civile et militaire

Créé en 1993 par le Ministre de la Défense, le Prix Lazare Carnot répond à deux objectifs :

- récompenser les travaux de recherche fondamentale ayant des perspectives d'applications à la fois civile et militaire, et effectués dans un laboratoire français,
- en s'appuyant sur ces travaux, concrétiser le rapprochement souhaité entre l'Académie des Sciences et la Défense.

Les lauréats sont choisis par un jury de l'Académie des Sciences selon ses usages.

C'est en hommage à celui qui a été surnommé *l'Organisateur de la Victoire* que l'appellation du Prix a été choisie : Lazare Carnot, illustre ministre de la guerre sous Bonaparte, puis ministre de l'intérieur, éminent ingénieur militaire et membre de l'Académie des Sciences, fût en effet le symbole du sursaut de la Nation pendant la Révolution. Officier de génie, il était spécialiste des fortifications et manifestait un vif intérêt pour les sciences de l'ingénieur, la physique, les mathématiques et tout particulièrement pour la géométrie projective au sujet de laquelle il a produit de nombreux ouvrages. Ses cendres reposent au Panthéon.

L'Académie des Sciences remet ce Prix tous les deux ans et accorde une récompense d'un montant de 30 500 euros au lauréat. Cette année, c'est Jacques Stern, éminent spécialiste en cryptologie, qui reçoit le Prix Lazare Carnot ce 25 novembre 2003. Ce prix est parrainé par la DGA, représentée par Pierre Guillon, conseiller scientifique auprès du délégué général pour l'Armement. Il témoigne de l'effort du ministère de la Défense dans le domaine de la recherche et illustre la politique de soutien de la DGA au monde scientifique et universitaire.

Jacques STERN : Un scientifique investi dans la recherche civile et militaire

Le Prix Lazare Carnot est remis cette année à Jacques Stern pour l'ensemble de ses travaux en cryptologie. Actuellement professeur et directeur du département informatique à l'Ecole Normale Supérieure (ENS), Jacques Stern est l'auteur de plus d'une centaine de publications sur le thème de la cryptologie et de trois ouvrages dont *La Science du secret* (Ed. Odile Jacob, 1996) : ces productions lui ont valu une renommée internationale. Le chercheur est aussi à l'origine d'un rapport remis au gouvernement qui a été suivi d'une nouvelle réglementation plus libérale sur la cryptographie.

Né en 1949, il fait ses études à l'ENS et il devient docteur ès-sciences en 1975. D'abord professeur dans les universités de Caen et de Paris 7, il devient directeur de recherche au CNRS en 1992. L'année suivante, il réintègre l'ENS en qualité de professeur. Tout en poursuivant ses enseignements, il est nommé directeur du laboratoire puis du département d'informatique de l'ENS en 1996. Par ailleurs, Jacques Stern est aussi membre du Conseil Scientifique de Défense, du Conseil Stratégique des Technologies de l'Information et de l'Observatoire de la Sécurité

des Cartes de paiements. Il a formé de nombreux élèves au meilleur niveau international, des universitaires et des chercheurs du CNRS, ainsi que la plupart des ingénieurs de l'armement qui travaillent sur ce sujet. Il a par ailleurs rédigé de nombreux rapports sur l'état des recherches actuelles en cryptologie au profit de la DGA.

Les travaux du spécialiste sont basés sur la problématique suivante : comment transmettre par écrit un secret sans risquer qu'il soit percé à jour par un tiers indésirable ? Comment l'auteur prouve-t-il qu'il est bien l'auteur de cet écrit, qu'il n'y a pas eu d'altération du contenu ? La cryptologie est la science qui apporte des réponses à ces questions. De telles problématiques font appel à de multiples aspects de la cryptologie qui sont l'objet des travaux de Jacques Stern :

- la cryptanalyse, c'est-à-dire le déchiffrement des codes adverses : l'attaque cryptographique,
- la recherche de techniques cryptographiques différentes de celles qui sont universellement utilisées, reposant sur des problèmes mathématiques issus de la théorie des nombres,
- l'élaboration de preuves de sécurité et la mise à niveau de schémas cryptographiques pour lesquels des vulnérabilités ont été découvertes,
- les applications de la "cryptologie interactive" à des contextes où plusieurs acteurs interviennent - et pas seulement l'émetteur et le récepteur d'un message - comme sur Internet : enchères en ligne, vote électronique, etc.

Ses recherches ouvrent de multiples perspectives d'applications. La cryptologie est en effet présente au quotidien :

- dans notre portefeuille (cartes à puce bancaire, Monéo),
- dans notre poche (badges pour le contrôle d'accès à certains sites industriels ou militaires),
- dans notre salon (décodeur pour la télévision),
- dans nos voitures pour l'ouverture des portes par un "jeton électronique" ou pour leur guidage par le signal GPS ou par le futur signal GALILEO, dont la précision est contrôlée par un mécanisme cryptographique,
- dans notre téléphone mobile où la carte SIM s'authentifie auprès du réseau de l'opérateur et où les communications entre le mobile et la borne sont chiffrées,
- sur notre bureau où notre ordinateur nous authentifie par un mécanisme fondé sur un mot de passe,
- entre les ordinateurs pour sécuriser les paiements en ligne.

Dans le domaine militaire, la confidentialité des données, en particulier les informations classifiées au niveau "confidentiel défense" ou "secret défense", est obtenue par chiffrement.

La DGA a pour mission de préparer le futur et de conduire les programmes dans le domaine de l'armement. Elle réalise aussi les équipements cryptographiques nationaux pour la protection des informations essentielles de l'état, comme par exemple des téléphones chiffrants fixes et mobiles, des chiffreurs de données compatibles avec les normes de l'Internet ou encore des logiciels de chiffrement

pour le poste de travail.

La cryptologie, du secret militaire aux travaux académiques :

Science du secret, la cryptologie vise à assurer l'intégrité, l'authenticité et la confidentialité des données et des communications.

Le premier document crypté connu remonte à l'antiquité : il s'agit d'une tablette d'argile découverte en Mésopotamie et datant du 16-ème siècle avant J-C. Un potier y avait gravé sa recette secrète en supprimant des consonnes et en modifiant l'orthographe des mots.

Longtemps restreinte aux usages militaires et diplomatiques, elle est aujourd'hui un élément essentiel à la sécurité d'Internet et au développement du commerce électronique. Ses nombreuses applications et l'importance qu'elle a acquise dans nos sociétés de communication ont élevé la cryptologie au rang de discipline universitaire. Le nombre croissant de colloques, de publications, de thèses sur le sujet témoignent de l'intérêt de très nombreux chercheurs.

Le Prix Lazare Carnot souligne la reconnaissance de monde scientifique à l'apport de cette discipline pour un nombre croissant d'applications, non plus seulement militaires mais aussi civiles.

Prix Jacques-Louis Lions (SMAI)

En collaboration avec l'INRIA et le CNES, dont Jacques-Louis Lions a été le Président respectivement de 1980 à 1984 et de 1984 à 1992, la Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles (SMAI) a créé en 2003 le Prix Jacques-Louis Lions. Grand Prix thématique de mathématiques appliquées de l'Académie des Sciences, décerné tous les deux ans, il est destiné à récompenser un scientifique pour un ensemble de travaux de très grande valeur en mathématiques appliquées, effectués en France ou en étroite relation avec un laboratoire français, dans les domaines dans lesquels Jacques Louis Lions a travaillé : équations aux dérivées partielles, théorie du contrôle, analyse numérique, calcul scientifique et leurs applications.

Roger TEMAM est né à Tunis en 1940. Après des études supérieures à l'université de Paris, il prépare une thèse de doctorat d'état avec Jacques-Louis Lions, thèse qu'il soutient en 1967. Il s'agissait principalement alors de l'étude des méthodes de pas fractionnaires avec déjà une application aux équations de Navier-Stokes. L'idée avait sans doute mûri à partir des contacts, alors nouveaux, de J.-L. Lions avec G. Marchuk. Roger Temam est ensuite devenu Professeur à l'université d'Orsay (Paris Sud) où il est depuis cette année 2003 Professeur émérite.

Roger Temam a créé une oeuvre scientifique immense : 292 articles publiés en novembre 2003, 10 livres (plus les traductions et éditions successives) parmi lesquels de grands classiques : Analyse Convexe avec I. Ekeland, Navier-Stokes Equations, Il a dirigé de très nombreux et brillants élèves dont la plupart sont actuellement professeurs des universités.

Les travaux de Roger Temam portent sur une très grande variété d'équations aux dérivées partielles non linéaires et sur les questions d'existence et régularité de solutions, d'approximation numérique, de contrôle, également sur des questions de modélisation. Un sujet reste tout de même la préoccupation principale : les équations de Navier-Stokes et tout ce qui tourne autour de cet immense problème : équations d'Euler, turbulence, comportement en grand temps,.... Mais il faut aussi citer, entre autres, les contributions majeures aux problèmes de calcul des variations (surfaces minima,...), aux problèmes de plasmas, aux problèmes de plasticité, aux méthodes de Galerkin non linéaires, aux questions de variétés inertielle et attracteurs, aux modèles couplés océan-atmosphère et plus généralement aux problèmes de fluides en géophysique... mais nous retrouvons là le sujet principal. Roger Temam a exercé dans sa carrière de nombreuses et importantes responsabilités, parmi lesquelles la création et la direction du Laboratoire d'Analyse Numérique d'Orsay, ainsi que la première Présidence de la SMAI.

Il a déjà été honoré par le Collège de France (prix Peccot), par l'Académie des Sciences (prix Carrière), par la fondation Cray (prix Cray) et par plusieurs institutions étrangères. Il est lauréat du premier Grand Prix Jacques-Louis Lions décerné par l'académie des Sciences. Il fut un très proche collaborateur de Jacques-Louis Lions et leurs travaux en commun font date, mais c'est surtout un très grand scientifique qui reçoit aujourd'hui ce prix prestigieux.

Prix Michel Monpetit (INRIA)

Prix annuel d'un montant de 5 300 euros, le prix Monpetit a été fondé par l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (INRIA), en hommage à Michel Monpetit directeur adjoint de l'IRIA, décédé dans l'exercice de ses fonctions en 1976. Il est destiné à récompenser un chercheur ou un ingénieur ayant accompli dans un laboratoire français des travaux de mathématiques appliquées relevant en particulier de l'informatique ou de l'automatique, de la robotique, du traitement des signaux, etc ...

Le lauréat devra s'être fait particulièrement remarquer par l'originalité des idées de base et le caractère appliqué de ses travaux. Ceux-ci pourront également être appréciés en fonction du souci de valorisation des résultats obtenus et des possibilités d'utilisation par l'industrie française.

Jean-François CARDOSO, 45 ans, est normalien et agrégé de physique. Il soutient sa thèse en 1984, sous la direction de Mathias Fink, à l'Université Paris VI, sur le sujet "Imagerie ultra-sonore quantitative". Directeur de recherche au CNRS, il est affecté au laboratoire de traitement et communication de l'information de Télécom Paris.

Jean-François Cardoso est un pionnier des méthodes de traitement statistique du signal dites de "séparation de sources" ou encore d'"analyse en composantes indépendantes", dont les applications sont variées, en télécommunications, bio-ingénierie, traitement des images et signaux audiophoniques ou même astronomie. Le traitement du signal est un domaine de grande importance, au sein des sciences et technologies de l'information. J-F. Cardoso s'y est révélé à la fois l'un des meilleurs théoriciens du domaine et un habile modélisateur de situations réelles et d'applications potentielles. Il y a acquis une grande visibilité internationale. Il est l'auteur de plus de cent publications.

La séparation des sources ou "analyse en composantes indépendantes" cherche à reconstituer des signaux inconnus, qui ont été distordus et mélangés de manière inconnue, avant d'être observés. Pour seule information : ces signaux proviennent de "sources" indépendantes. Ce problème donne actuellement lieu à un essor de travaux fondamentaux et applicatifs, tant en France qu'à l'international.

J-F. Cardoso a contribué à l'élaboration théorique du domaine de la séparation de sources. Il a aussi su concevoir divers algorithmes permettant d'exprimer et d'exploiter au mieux, en fonction des applications, la propriété d'indépendance statistique, qui est au coeur de ces méthodes.

Prix Blaise Pascal (GAMNI-SMAI)

Prix annuel fondé en 1984 par la Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles (SMAI) et le Groupement pour l'avancement des méthodes numériques de l'ingénieur (GAMNI), ce prix, d'un montant de 1530 euros, est décerné chaque année par l'Académie des Sciences. Il est destiné à récompenser un chercheur ayant accompli en France un travail remarquable dans le domaine des mathématiques appliquées et du calcul numérique dans les sciences de l'ingénieur.

Valérie PERRIER, a 38 ans. Normalienne de formation et agrégée de mathématiques, elle soutient en 1991 une thèse sous la direction de Claude Basdevant à Paris VI, sur le sujet : "Ondelettes et Simulation Numérique". Après avoir été maître de conférences puis professeur à l'Université Paris XIII, elle est depuis 1999 professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble.

Les travaux de recherche de Valérie Perrier portent principalement sur la simulation numérique des écoulements turbulents, modélisés par les équations de Navier-Stokes, par des méthodes adaptatives utilisant les bases d'ondelettes. Introduites au début des années 1980, les bases d'ondelettes permettent de décomposer des fonctions arbitraires, de façon analogue aux séries de Fourier mais avec deux propriétés plus spécifiques : la possibilité d'analyser la régularité locale d'une fonction par l'examen de la taille des coefficients, et la possibilité de compresser efficacement les fonctions en ne conservant que leur plus grands coefficients. Cette dernière propriété joue un rôle crucial dans le nouveau standard de compression d'image JPEG 2000. Il faut ici souligner la cohérence du programme de recherche de Valérie Perrier. Dans un premier temps, en collaboration avec Marie Farge de l'ENS, elle a appliqué l'analyse par ondelettes aux écoulements turbulents (obtenus par des simulations numériques classiques) afin d'analyser leur régularité locale. Cette analyse a permis de montrer que les ondelettes étaient pertinentes pour la simulation numérique de ces écoulements dans le sens où, comme pour la compression d'image, elles permettent de réduire largement le nombre de degrés de liberté tout en préservant les structures fines telles que les pics de vorticité. En parallèle, elle a mis au point des techniques importantes pour l'utilisation des bases d'ondelettes en simulation numérique : calcul des opérateurs de dérivation dans ces bases et prise en compte des conditions aux limites. Enfin, elle a mis au point le premier code de résolution des équations de Navier-Stokes par une méthode d'ondelettes adaptatives, confirmant ainsi son rôle de pionnière dans ce domaine. Son activité de recherche récente s'oriente aussi vers des applications en traitement de l'image biomédicale. Le prix Blaise Pascal 2003 récompense ainsi une scientifique de haut niveau dans des domaines d'applications pertinents.

Prix Louis Armand

Prix biennal, fondé par l'association des Amis de Louis Armand, récompensant un jeune chercheur français, âgé de 30 ans au plus, pour un travail remarquable portant sur l'une des disciplines suivantes : mathématiques appliquées, mécanique, physique, chimie, biologie, sciences de la terre.

Laure SAINT RAYMOND : les résultats obtenus par Laure Saint-Raymond expliquent, sur le plan mathématique, la transition entre la théorie cinétique des gaz à l'échelle atomique et les modèles continus de la mécanique des fluides à l'échelle macroscopique. Ses travaux répondent en partie à l'un des problèmes fondamentaux des mathématiques posés en 1900 par D. Hilbert, et ont des applications diverses : physique des plasmas, aérodynamique dans la haute atmosphère etc..

Ancienne élève de l'Ecole Normale Supérieure, Laure Saint-Raymond a été élue professeur à l'Université Paris VI, en 2002, à l'âge de 27 ans. Elle est membre du Laboratoire Jacques-Louis Lions.

Conception et analyse d'algorithmes cryptographiques

Jacques Stern

École normale supérieure, Département d'informatique
Rue d'Ulm, 75 005 Paris
[http ://www.di.ens.fr/~stern](http://www.di.ens.fr/~stern)

1. Introduction

Le texte qui suit reprend une présentation faite à l'IHP lors d'une réunion en l'honneur des lauréats des prix d'informatique et de mathématiques appliquées attribués en 2003 par l'Académie des sciences. Après avoir brièvement rappelé les fondements de la cryptologie et ses principales fonctionnalités, l'auteur donne deux exemples de travaux de recherche auxquels il a participé et qui illustrent à son avis l'évolution récente de la discipline.

2. Qu'est ce que la cryptologie ?

2.1. Définitions

La *cryptologie* est informellement la science des messages secrets. Longtemps restreinte aux usages diplomatiques et militaires, elle est maintenant une discipline scientifique à part entière, qui a pour objet l'étude des méthodes permettant d'assurer les services d'intégrité, d'authenticité et de confidentialité dans les systèmes d'information et de communication.

La cryptologie se partage en deux sous disciplines, également importantes : la *cryptographie* dont l'objet est de proposer des méthodes pour assurer les services définis plus haut et la *cryptanalyse* qui recherche des failles dans les mécanismes ainsi proposés.

2.2. La cryptographie symétrique

Pendant très longtemps, il n'a existé qu'un seul type de cryptographie : la cryptographie symétrique où l'on suppose qu'au moins deux personnes partagent la connaissance d'un même secret, et ont donc alors des rôles symétriques. Cette cryptographie est aussi connue sous le nom de *cryptographie à clé secrète* ou *cryptographie conventionnelle*.

La cryptographie symétrique est principalement liée aux services de confidentialité. Elle réalise sur les données m une transformation $c = E_k(m)$, par l'intermédiaire d'un algorithme de *chiffrement* E . Cet algorithme prend en entrée le message clair m et un paramètre secret k , qu'on appelle la *clé*. La restauration du texte clair à partir du *chiffré* ou *cryptogramme* c se fait par un algorithme de *déchiffrement* D_k , prenant en entrée le chiffré et la même clé.

La distinction entre l'algorithme et la clé s'est établie il y a fort longtemps, notamment dans les travaux du cryptologue Auguste Kerckhoffs [6], dont le second

principe s'énonce en effet : "Il faut qu'il [le système] n'exige pas le secret, et qu'il puisse sans inconvénient tomber entre les mains de l'ennemi".

L'opération qui consiste à calculer le clair m à partir du chiffré $c = E_k(m)$, mais sans la connaissance de la clé k est appelée *décryptement*. La confidentialité est assurée si cette opération est impossible, ce que Kerckhoffs a traduit dans son premier principe par la formule : "Le système doit être matériellement, sinon mathématiquement, indéchiffrable".

2.3. La cryptographie asymétrique

Dans le chiffrement symétrique, chiffrement et de déchiffrement utilisent la même clé. Pourtant, rien n'impose dans l'absolu que les clés de chiffrement et de déchiffrement soient identiques. Si l'on pousse à l'extrême le second principe de Kerckhoffs, même la clé de chiffrement peut passer sans inconvénient aux mains de l'ennemi. On a dans ce cas une clé de chiffrement publique connue de tous, et une clé de déchiffrement distincte qui reste privée. Le chiffrement devient asymétrique, l'expéditeur et le destinataire n'ayant plus des rôles symétriques : seul le destinataire dispose de la clé privée lui permettant de déchiffrer. Cette possibilité a été découverte par Diffie et Hellman dans [4], mais il revient à Rivest, Shamir et Adleman dans [11] d'avoir proposé le premier système de chiffrement asymétrique. Ce système, appelé RSA du nom de ses auteurs, est de loin le cryptosystème asymétrique le plus répandu au monde. Sa sécurité est reliée à la difficulté algorithmique conjecturée de la factorisation des entiers.

3. Deux exemples

3.1. Quelle sécurité ?

Un des aspects les plus significatifs de la recherche sur la cryptographie asymétrique est consituée par un effort pour pousser également à son terme le premier principe de Kerckhoffs. On a ainsi donné plusieurs définitions mathématiques de notions de sécurité et on a construit des cryptosystèmes prouvés sûrs pour ces définitions. Il convient toutefois de relativiser la portée des résultats obtenus. En effet, les preuves obtenues sont toutes relatives à des conjectures sur la difficulté algorithmique de problèmes bien définis comme la factorisation des entiers, le logarithme discret, *etc.* De plus, dans la plupart des cas, on utilise un modèle connu sous le nom de *modèle de l'oracle aléatoire* [2], qui considère certaines fonctions cryptographiques parfaitement déterministes, appelées fonctions de hachage, comme aléatoires. Bien que très fructueux, ce modèle n'est qu'une idéalisation. Cela étant, d'un point de vue pragmatique, une preuve dans un modèle idéalisé vaut mieux qu'une absence de preuve.

A condition bien sûr que la preuve soit correcte ! En 1994, Bellare et Rogaway [3] ont introduit une nouvelle méthode pour le chiffrement RSA et ont prouvé qu'elle permettait d'obtenir la sécurité la plus élevée, que le RSA "pur" ne peut absolument pas atteindre à causes de ses propriétés algébriques. Ils ont donné à

cette méthode le nom OAEP (Optimal Asymmetric Encryption Padding). Cette méthode a rapidement été adoptée dans des normes internationales. En 2000, Victor Shoup [12], a montré, par un argument indirect très subtil, que la preuve était incorrecte. L'année suivante, Fujisaki, Okamoto, Pointcheval et l'auteur [5] ont pu proposer une autre preuve, fondée sur des arguments complètement différents, au grand soulagement des instances de normalisation.

3.2. Quelles alternatives à RSA ?

Une autre tendance significative de la recherche sur la cryptologie à clé publique est motivée par la recherche d'alternatives à RSA. Une stratégie répandue s'appuie sur la théorie de la complexité, et plus précisément sur les problèmes dits NP-difficiles. En 1997, Ajtai et Dwork [1] ont proposé un cryptosystème fondé sur une variante d'un problème NP-difficile. La clé privée de leur système est un vecteur unitaire u dans un espace de dimension n . Le chiffrement se fait bit à bit : un bit à zéro est codé par un point proche d'un élément de la famille d'hyperplans (cachés) d'équation $(x, u) = i$, où i est un entier. Un bit à un est codé par un point éloigné. Malgré la preuve de sécurité, Nguyen et l'auteur [9] ont publié l'année suivante une cryptanalyse du système. La preuve était pourtant correcte ! Mais l'attaque était couronnée de succès pour à peu près toute valeur des paramètres ayant une signification pratique.

4. Conclusion

Par sa brièveté, la présentation qui précède laisse sans doute le lecteur sur sa faim. On ne peut que le renvoyer à des textes plus généraux tels que [8, 13]. Un mot toutefois pour révéler un point commun entre les deux exemples cités dans les paragraphes précédents : ils utilisent tous deux l'algorithme de réductions de réseaux de Lenstra, Lenstra et Lovász [7]. Les liens entre la géométrie des nombres et la cryptologie (voir [10]) sont d'ailleurs fascinants.

Références

- [1] M. Ajtai & C. Dwork, A Public-Key Cryptosystem with Worst-Case/Average-Case Equivalence, Proc. 29th ACM Symposium on Theory of Computing, 1997, 284–293.
- [2] M. Bellare & P. Rogaway. Random Oracles Are Practical : a Paradigm for Designing Efficient Protocols. In *Proc. of the 1st CCS*, pages 62–73. ACM Press, New York, 1993.
- [3] M. Bellare & P. Rogaway. Optimal Asymmetric Encryption – How to Encrypt with RSA. In *Eurocrypt '94*, LNCS 950, pages 92–111. Springer-Verlag, Berlin, 1995.
- [4] W. Diffie & M. E. Hellman. New Directions in Cryptography, *IEEE Trans. Inform. Theory*, IT-22, 1976, 644–654.

- [5] E. Fujisaki, T. Okamoto, D. Pointcheval & J. Stern. RSA–OAEP is Secure under the RSA Assumption. In *Crypto '2001*, LNCS 2139, pages 260–274. Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- [6] A. Kerckhoffs. *La cryptographie militaire*, Paris, 1883.
- [7] A. K. Lenstra, H. W. Lenstra & L. Lovász. Factoring polynomials with rational coefficients, *Math. Ann.*, vol 261, 1982, 515–534.
- [8] A.J. Menezes, P.C. van Oorschot & S.A. Vanstone. *Handbook of applied cryptography*, CRC Press, new York, 1997.
- [9] P. Nguyen & J.Stern. Cryptanalysis of the Ajtai- Dwork Cryptosystem, *Advances in Cryptology - Proceedings of CRYPTO '98*, volume 1462 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, 1998, 223 - 242.
- [10] P. Q. Nguyen & J. Stern. The two faces of lattices in cryptography. In *Cryptography and Lattices – Proc. CALC '01*, volume 2146 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 146–180. Springer-Verlag, 2001.
- [11] R. Rivest, A. Shamir & L. Adleman. A Method for Obtaining Digital Signatures and Public Key Cryptosystems. *Communications of the ACM*, 21(2) :120–126, February 1978.
- [12] V. Shoup. OAEP Reconsidered. In *Crypto '2001*, LNCS 2139, pages 239–259. Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- [13] J. Stern. *La science du secret*, Éditions Odile Jacob, Paris, (1998).

Quelques remarques sur les équations de l'atmosphère et de l'océan

Roger Temam

Avant d'aborder la présentation scientifique, je voudrais remercier les organismes qui ont créé le Prix Jacques-Louis Lions, l'Académie des Sciences, le CNES, l'INRIA et la SMAI, et je remercie l'Académie des Sciences pour m'avoir attribué le Prix cette année. Je me sens très honoré de recevoir ce Prix qui porte le nom de l'un des fondateurs de l'Ecole Française de Mathématiques Appliquées.

Le temps qui m'est imparti ne suffirait pas à rappeler la personnalité et l'œuvre de Jacques-Louis Lions, mais je voudrais tout de même évoquer quelques souvenirs des débuts¹. Outre son immense talent scientifique, Jacques-Louis Lions était un visionnaire : il savait prévoir l'évolution des événements, ses collaborateurs ont pu le constater bien des fois tout au long des années. Très tôt, dès la fin des années 50, quand les ordinateurs étaient encore des appareils volumineux et coûteux, bien moins performants que l'un quelconque de nos portables, J.-L. Lions a compris tout ce que l'ordinateur allait apporter à la science et aux mathématiques, et il s'est engagé dans cette voie avec l'énergie qui lui était coutumière, donnant toute son impulsion aux mathématiques appliquées en France en milieu universitaire.

J'ai commencé à travailler avec J.-L. Lions peu après ses débuts en analyse numérique ; quelques-uns m'avaient précédé, beaucoup ont suivi. J.-L. Lions n'avait pas encore fondé le Laboratoire de Jussieu qui porte son nom maintenant. Il exerçait ses activités "numériques" à l'Institut Blaise Pascal dans le nord de Paris, et ses activités plus théoriques dans ce même Institut Henri Poincaré avant sa rénovation (où était concentrée toute l'activité mathématique parisienne).

Je considère que j'ai eu beaucoup de chance, professionnellement, d'avoir été le témoin de cet événement rare qu'est la naissance d'une école mathématique. Cette école se prolonge maintenant à travers les nombreux descendants scientifiques de Jacques-Louis Lions, y compris, bien sûr, son propre fils Pierre-Louis.

J'ai aussi eu la chance d'être le témoin d'un autre événement rare qui en était le corollaire, la naissance de la SMAI. Michel Thera et Jean-Pierre Puel ont rappelé que la SMAI fêtait ses vingt ans cette année. J'ai fait partie de l'équipe qui a mis en place la société, ce qui a été l'occasion de beaucoup d'aventures intéressantes et parfois inhabituelles pour un mathématicien. Je suis heureux de voir que la SMAI est maintenant une société bien établie et lui adresse tous mes bons vœux pour le futur.

¹Parmi les nombreux articles évoquant la vie et l'œuvre de J.-L. Lions, on rappelle celui en français de P.G. Ciarlet (MATAPLI No 66, Octobre 2001, qui contient aussi de nombreux témoignages personnels) et celui en anglais de R. Temam (Jacques-Louis Lions, 1928-2001, *Notices of AMS* December 2001)

1. Les modèles de circulation générale

De nombreux modèles sont utilisés pour décrire les phénomènes de l'atmosphère et l'océan avec des niveaux de complexité très variés allant de quelques équations différentielles qui décrivent des bilans d'énergie jusqu'à des ensembles très complexes d'équations qui constituent les Modèles de Circulation Générale et les Modèles de Circulation Générale de l'Océan (MCG et MCGO).

Du point de vue physique, les MCG et MCGO prennent en compte de nombreux phénomènes et paramètres, vitesse du vent ou de l'eau, température, salinité, végétation, nuages, orographie, concentration des polluants et réactions chimiques, présence et mouvement des glaces en mer, mouvement des sédiments marins, etc.

Du point de vue mathématique, de tels phénomènes sont décrits par des équations différentielles et aux dérivées partielles non linéaires, de complexité comparable, voire légèrement supérieure, aux équations de la mécanique des fluides qui font l'objet, depuis l'an 2000, du fameux Prix Clay. Faute d'une résolution exacte impensable, on fait des simulations numériques.

Du point de vue informatique, les problèmes numériques correspondants nécessitent des moyens considérables, pour la résolution des équations, le pré- et post-traitement et pour la gestion des données.

2. Mathématique et Géophysiques

La rencontre des mathématiques et des sciences de l'atmosphère et de l'océan n'est pas nouvelle ; les Equations Primitives (EP) de l'atmosphère et de l'océan, qui sont au coeur des MCG et MCGO, ont essentiellement été introduites en 1928 par Richardson, bien connu dans la communauté du calcul scientifique en raison des algorithmes qui portent son nom. Richardson pensait déjà aux prévisions météorologiques fondées sur la résolution numériques de EP, mais il avait sous-estimé la difficulté du problème, croyant que la résolution numérique des EP était à portée de main.

Sans sous-estimer l'importance des travaux qui ont suivi, on arrive à une autre rencontre importante des mathématiques et des sciences géophysiques avec les travaux de von Neumann dans les années 40. Après avoir construit le premier ordinateur, von Neumann envisage son utilisation pour résoudre différents problèmes scientifiques, en particulier les équations de l'atmosphère ; il fonde ainsi avec ses élèves, J.G. Charney et d'autres, la météorologie moderne. Renonçant aux équations primitives encore trop difficiles pour l'époque, ils consacrent leurs premières études aux modèles barotropiques et aux modèles quasi-géostrophiques (approximation des modèles géostrophiques pour lesquels les gradients de pression sont en équilibre avec les forces de Coriolis).

De nos jours, des collaborations se développent entre mathématiciens et géophysiciens. La géophysique est le lieu de rencontre de très nombreux domaines scientifiques (physique, chimie, biologie, etc.), et les mathématiques sont l'un de ces

domaines. Certains géophysiciens pensent que les mathématiciens peuvent aider, et les mathématiciens sont heureux d'y trouver des problèmes difficiles et intéressants.

3. Les équations primitives

J'illustre cette rencontre des mathématiques et des sciences de l'atmosphère et de l'océan par deux exemples ponctuels centrés sur les Equations Primitives (EP), l'un plus théorique – plus mathématique – et l'autre plus numérique. Les EP jouent un rôle central dans la hiérarchie de modèles décrivant le mouvement de l'océan et de l'atmosphère (en particulier pour les MCG et MCGO).

EP avec viscosité

La théorie mathématique des EP en présence de viscosité a été commencée par Lions, Wang et Temam [3,4], dans les années 1990 (questions d'existence, d'unicité et de régularité des solutions). Comme il a été dit les EP sont un peu plus complexes que les équations de Navier-Stokes des fluides incompressibles, le terme non linéaire étant moins régulier : dans les équations de Navier-Stokes, le terme non linéaire – terme inertiel – est de la forme

$$\text{vitesse du fluide} \times \text{dérivée de la vitesse.}$$

Dans les EP le terme non linéaire est, à peu près, de la forme

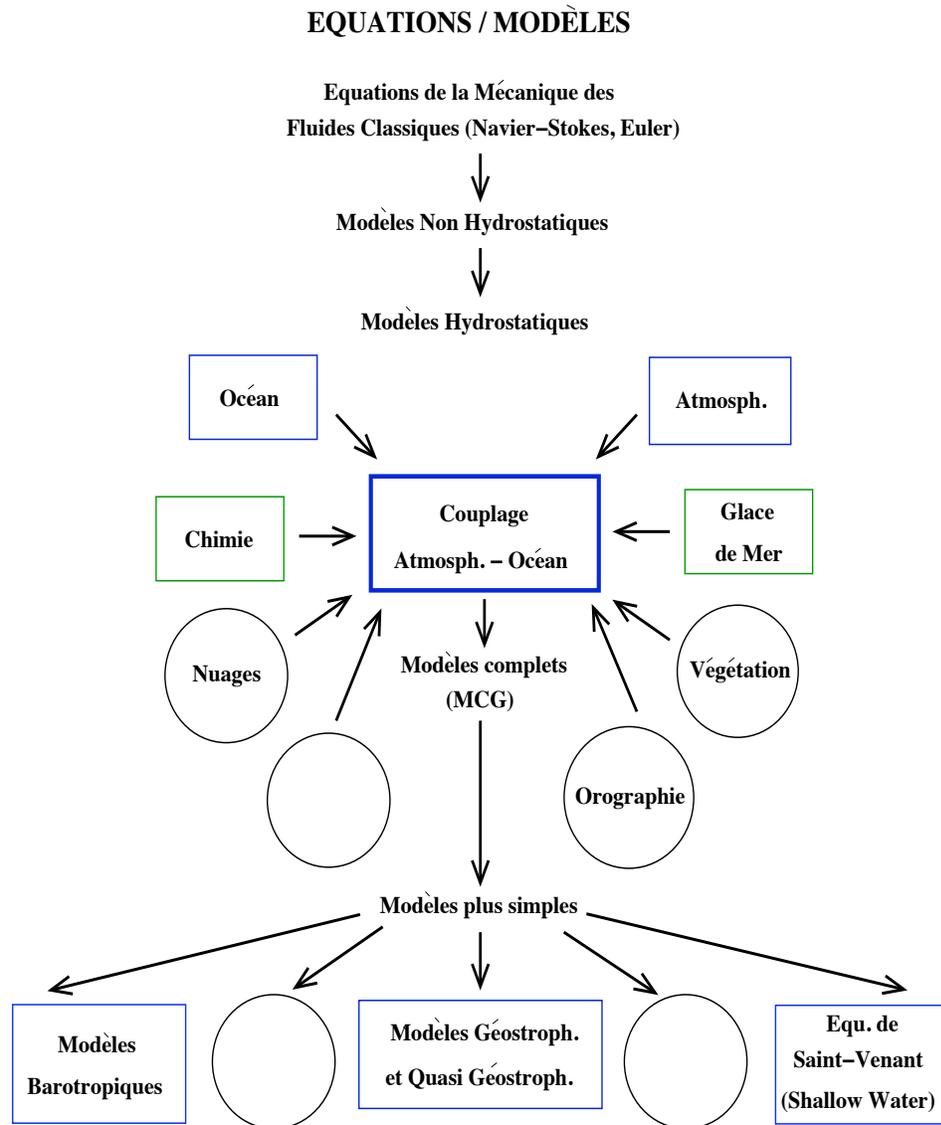
$$\text{dérivée de la vitesse horizontale} \times \text{dérivée de la vitesse horizontale.}$$

Pour cette raison les résultats de [3,4] sont un peu moins précis que ceux relatifs aux équations de Navier-Stokes incompressibles, en dimensions deux et trois.

Un certain nombre de développements ultérieurs dus à Bresch, Hu, Masmoudi, Ziane, l'auteur, et d'autres ont permis d'obtenir pour les EP *essentiellement* les mêmes résultats d'existence, d'unicité et de régularité de solutions que pour les équations de Navier-Stokes, en dimensions deux et trois. Un trait essentiel de ces derniers travaux est le traitement anisotropique de la direction verticale alors que les trois directions jouent le même rôle dans [3,4]. De nombreux résultats récents ou moins récents sont présentés dans l'article de revue [10].

EP sans viscosité

L'effet des termes visqueux ne se fait sentir qu'après un temps relativement long et, d'habitude, dans les simulations numériques, les termes visqueux sont négligés. Toutefois Oliger et Sundström [5] ont montré qu'il n'existe pas d'ensemble de conditions aux limites de type local pour lesquelles les EP sans viscosité sont bien posées, ce qui génère des difficultés importantes pour les simulations numériques. Une autre difficulté s'y ajoute : pour les modèles régionaux, les frontières n'ont pas de signification physique et il est souhaitable d'éviter les réflexions artificielles des ondes sur ces frontières ; d'où le recours très souhaitable à des conditions aux limites de type transparent [1],[9]. Nous présentons à présent deux éléments de réponse.



Les équations δ -EP

Une première approche est considérée dans un article de Tribbia et l'auteur [8], qui introduit dans les EP un terme "faiblement visqueux" δw , $\delta > 0$, qui est rajouté à l'équation hydrostatique. D'où, pour l'océan (par exemple), le système suivant qui représente les EP quand le terme δw est omis :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + w \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} + f \mathbf{k} \times \mathbf{v} + \nabla \varphi = 0, \\ (\delta w) + \frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\rho g, \\ \nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \theta + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, \\ \rho = \rho(\theta). \end{array} \right. \quad (1)$$

Ici \mathbf{v} est la vitesse horizontale de l'eau, w la vitesse verticale, θ la température, φ un terme de pression, ρ la densité (liée à θ par l'équation d'état), $f\mathbf{k}$ la rotation angulaire de la terre et g la constante gravitationnelle.

Des articles à paraître complèteront [8] sur les questions d'existence et d'unicité de solution du système (1), complété par des conditions aux limites et initiales.

Analyse modale

Une autre étude par Rousseau, Tribbia et l'auteur [7] a pour objet une analyse modale des équations δ -EP (analyse spectrale par rapport à la direction verticale). Cette analyse (théorique et numérique) met en évidence

- des phénomènes de couches limites à la frontière (pour l'étude desquels la méthode des correcteurs introduite par J.-L. Lions est bien utile),
- des phénomènes de réflexion à la frontière,
- des modifications permettant d'éviter ces réflexions indésirables.

Des études numériques ultérieures devront comparer les inconvénients du système (1) simple à implémenter mais qui produit des réflexions d'ondes à la frontière qui ne sont pas désirables, à ceux des conditions aux limites transparentes qui évitent ces réflexions mais sont plus difficiles à implémenter.

Références

- [1] C. Bardos, F. Golse, and C.D. Levermore, *Fluid Dynamic Limits of Kinetic Equations II : Convergence Proofs for the Boltzmann Equation*, Commun. Pure & Appl. Math **46** (1993), 667-753.
- [2] B. Engquist, A. Majda, Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves, *Math. Comp.*, 31, 1977, 629-651.
- [3] J.-L. Lions, *Selected works*, vol. 1, EDS Sciences, Paris, 2003.

- [4] J.-L. Lions, R. Temam, S. Wang, New formulations of the primitive equations of the atmosphere and applications, *Nonlinearity*, 5, 1992, 237-288.
- [5] J.-L. Lions, R. Temam, S. Wang, On the equations of the large-scale ocean, *Nonlinearity*, 5, 1992, 1007-1053.
- [6] J. Oliger, A. Sundström, Theoretical and practical aspects of some initial boundary value problems in fluid dynamics, *SIAM J. Appl. Math.*, 35, 1978, 419-446.
- [7] A. Rousseau, R. Temam, Boundary conditions for an ocean related system with a small parameter, dans *Nonlinear PDEs and Related Analysis*, Gui-Qiang Chen, George Gasper and Joseph J. Jerome Eds, *Contemporary Mathematics*, AMS, Providence, soumis.
- [8] A. Rousseau, R. Temam, J. Tribbia, Boundary layers in an ocean related system, *J. Scientific Computing*, à paraître.
- [9] R. Temam, J. Tribbia, Open boundary conditions for the primitive and Boussinesq equations, *J. Atmospheric Sciences*, 132,1, 2004, 154-164.
- [10] L. Trefethen, L. Halpern, Well-posedness of one-way wave equations and absorbing boundary conditions, *Math. Comp.*, 47, 1986, 421-435.
- [11] R. Temam, M. Ziane, Some mathematical problems in geophysical fluid dynamics, dans *Handbook of Mathematical Fluid Dynamics*, vol. 3, S. Friedlander et D. Serre Ed., Elsevier, 2004, à paraître.

La cocktail party et autres problèmes compliqués

Jean-François Cardoso

CNRS/LTCL, 46 rue Barrault, 75634 Paris, France

cardoso@tsi.enst.fr <http://tsi.enst.fr/~cardoso/>

Cocktail party.

On peut être surpris de notre capacité à extraire du brouhaha d'une cocktail party les paroles que nous adresse un interlocuteur. Si un tel exploit est certainement à mettre au crédit des couches supérieures du cortex, le terme de « cocktail party » est néanmoins devenu le surnom affectueux d'un problème de traitement des données n'ayant qu'un rapport lointain avec les neuro-sciences : la séparation de sources.

Diversité.

Imaginez plusieurs capteurs « à l'écoute » d'une scène compliquée : deux oreilles dans une cocktail party, huit électrodes d'électrocardiographie sur l'abdomen d'une femme enceinte, quinze radiomètres cartographiant le fonds de rayonnement cosmologique, trois antennes de télécommunications captant les émissions de vos téléphones portables, cent cinquante canaux d'un satellite d'imagerie multispectrale, ... Dans ces circonstances (et de nombreuses autres), chacun des capteurs fournit un point de vue différent sur une scène complexe. On parle de la *diversité* offerte par des observations multi-capteurs.

Mélange et séparation de sources.

Cette diversité offre une merveilleuse voie d'approche au traitement des données (du signal, des images, ...). Imaginons qu'une scène observée par n capteurs soit due à la présence de n sources de signaux S_j ($j = 1, n$), qu'elle soit la superposition d'autant de composantes sous-jacentes. Si chaque signal source contribue linéairement au signal X_i reçu sur le i -ème capteur, on peut écrire $X_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} S_j$ où le coefficient a_{ij} représente le poids de la j -ème source dans la i -ème observation. Si, dans ce modèle élémentaire de mélange,¹ les coefficients a_{ij} sont connus, il est immédiat d'inverser le mélange (la diversité est ici équivalente à l'inversibilité du système linéaire) pour avoir accès aux signaux sources : au babil de notre voisin de cocktail, à l'EKG foetal, aux composantes astrophysiques, aux émissions de chaque téléphone portable, ... Autrement dit, la diversité c'est la séparabilité, une propriété qu'on devine riche d'applications. Mais comment passer de la séparabilité à la séparation ?

¹Des modèles plus sophistiqués ajoutent un bruit additif, remplacent les coefficients a_{ij} par des filtres de convolution, ne supposent pas autant de sources que de capteurs, etc. Les plus intrépides considèrent des combinaisons non linéaires...

À l'aveuglette.

Dans la plupart des applications où l'on peut supposer observer un mélange linéaire de sources élémentaires, les coefficients du mélange sont cependant inconnus *a priori*. On peut tenter de les estimer en modélisant la physique du problème mais cette tâche s'annonce ardue : physique de la propagation des sources aux capteurs, détails de la transduction. Modéliser cette physique peut être très difficile (propagation en trajets multiples, dérives des caractéristiques des instruments de mesure, nombreux paramètres libres tels que les positions relatives des sources aux capteurs, etc). Au total, la difficulté ne réside pas dans l'inversion du mélange mais bien dans la *détermination* des coefficients de ce mélange (ou de son inverse).

Que faire pour accéder aux sources élémentaires du signal sans recourir à un modèle physique ? Les méthodes dites de « séparation de sources » proposent une approche radicale : renoncer à toute modélisation physique du mélange et compenser ce déficit d'information par une hypothèse très forte mais souvent très plausible : celle de l'*indépendance statistique* des signaux sources. Autrement dit, on échange de la physique pour de la statistique. On parle alors de méthode « aveugle » ou encore de méthode « autodidacte » car toute l'information ne provient que des données elles-mêmes et non d'une connaissance *a priori*. Il faut maintenant comprendre comment l'hypothèse d'indépendance permet la séparation « à l'aveuglette » de sources mélangées.

Mélange et indépendance.

Soit $S = [S_1, S_2, \dots, S_n]^\dagger$ un vecteur de variables aléatoires statistiquement indépendantes. Pour une matrice $n \times n$ inversible A donnée, les éléments du vecteur $X = AS$ constituent n mélanges linéairement indépendants de n « sources » statistiquement indépendantes. Pour toute matrice B , inversible de taille $n \times n$, formons alors $Y = BX$, c'est-à-dire n mélanges des observations X . Si $B = A^{-1}$ alors les éléments de Y sont indépendants (puisque alors $Y = S$).

Si la réciproque est vraie alors nous disposons d'un principe de séparation aveugle ! En effet, cette réciproque impliquerait qu'il suffit de rétablir l'indépendance pour inverser le mélange. Dans quelle mesure cette réciproque est-elle vraie ?

Faiblesse de la corrélation.

Pour des variables aléatoires *gaussiennes*, l'indépendance se réduit à la décorrélation. Alors l'indépendance des éléments de Y équivaut à la condition $\text{Corr}(Y_i, Y_j) = 0$ pour toutes les paires ($i \neq j$) de variables. Mais la corrélation étant une quantité symétrique, $\text{Corr}(Y_i, Y_j) = \text{Corr}(Y_j, Y_i)$, il n'existe en fait que $n(n-1)/2$ conditions de décorrélation. Ce nombre de contraintes est insuffisant pour déterminer sans ambiguïté une transformation linéaire puisque celle-ci possède n^2 degrés de liberté. Si les variables S_i sont gaussiennes, il y a en fait

une infinité de matrices B telles que les éléments de $Y = BX$ soient décorrélés et donc, puisque gaussiens, indépendants. Par conséquent, il est impossible de séparer « à l'aveuglette » un mélange de sources gaussiennes.

Une conclusion complémentaire est la suivante : quelle que soit la distribution des sources, si celles-ci sont *modélisées* comme étant gaussiennes, alors leurs propriétés statistiques dans ce modèle gaussien s'expriment intégralement par leurs corrélations (on parle de « statistiques exhaustives »). Par conséquent, un modèle gaussien, ne s'appuyant que sur les corrélations, ne permet pas non plus la séparation à l'aveuglette.

En conclusion, deux conditions sont nécessaires pour la séparation des sources à l'aveuglette : que les sources soient non gaussiennes, mais aussi que leurs propriétés statistiques soient exprimées dans un modèle non gaussien. La non gaussianité est requise dans les données *et* dans le modèle. Mais ces conditions sont elles suffisantes ?

Force de l'indépendance.

Un résultat dû à Linnik fournit un principe de séparation à l'aveuglette : si *au plus* des éléments de S est une variable gaussienne, et si les éléments de $Y = BX = BAS$ sont statistiquement indépendants, alors la matrice B ne peut être qu'un « séparateur ». Par ce terme, nous entendons que BA est l'identité, ou une matrice de permutation, ou une matrice diagonale ou un produit de ces derniers types puisque, dans ce cas, le vecteur $Y = BAS$ contient alors les éléments de S , quoiqu'à une échelle arbitraire et possiblement permutés. À ces indéterminations près, la séparation est donc obtenue, selon Linnik, lorsque les éléments de Y sont indépendants et seulement dans ce cas.

En conclusion : mélanger linéairement des sources indépendantes non gaussiennes les rend dépendantes ; restaurer linéairement l'indépendance ne peut se faire qu'en séparant les sources. Nous disposons donc, grâce à Linnik, d'un principe de séparation à l'aveuglette : séparer les sources en cherchant les transformations linéaires qui rendent les observations indépendantes.

Composantes indépendantes ou composantes principales ?

L'analyse en composantes indépendantes (ou A.C.I.) est la recherche d'une transformation linéaire d'un vecteur aléatoire rendant ses éléments « aussi indépendants que possible ». Formellement, il s'agit donc, pour un vecteur aléatoire X de taille n , de résoudre : $\min_{B \in GL(n)} I(BX)$ où $I(Y)$ est une mesure de la dépendance des coordonnées d'un vecteur aléatoire Y (voir une définition possible ci-dessous).

L'analyse en composantes principales (ou A.C.P.) est une technique classique d'analyse des données ; elle permet de décomposer un n -vecteur en n composantes décorrélées. Il existe (nous l'avons vu), une infinité de telles transformations ; parmi celles-ci, l'A.C.P. choisit (de façon essentiellement unique) une transformation orthogonale. Cette contrainte d'orthogonalité, quoique très raisonnable à certains égards, n'a aucun rapport avec notre objectif de découvrir des sources

indépendantes dans un mélange car rien ne permet de supposer que le mélange soit une transformation orthogonale.

Plutôt que de compléter un objectif de décorrélation par une contrainte géométrique arbitraire, l'analyse en composantes indépendantes poursuit un objectif purement statistique plus fort : l'indépendance maximale. Selon Linnik, atteindre cet objectif, résout le problème de séparation de sources à l'aveuglette. Mais comment mesurer l'indépendance *au delà* de la décorrélation ?

Indépendance statistique, information mutuelle, maximum de vraisemblance.

Comon a proposé de mesurer l'indépendance par l'information mutuelle : $I(Y) = D(P_Y | \prod_i P_{Y_i})$ où P_Y est la distribution de Y , où $\prod_i P_{Y_i}$ est le produit de ses distributions marginales et où $D(\cdot | \cdot)$ est la divergence de Kullback-Leibler entre deux distributions de probabilité : $D(f | g) = \int f \log \frac{f}{g}$. On montre que $I(Y) \geq 0$ avec égalité si et seulement si les éléments de Y sont indépendants.

Cette mesure de dépendance est une généralisation naturelle à un nombre quelconque de variables de la notion d'information mutuelle entre deux variables qui est centrale à la théorie de l'information. Mieux, on montre que cette mesure de dépendance se déduit du principe du maximum de vraisemblance. C'est par conséquent une façon efficace (au sens statistique) d'exprimer l'indépendance dans le problème de séparation de sources.

Indépendance, décorrélation et gaussianité.

La séparation de sources à l'aveuglette requiert d'exprimer l'indépendance au delà de la décorrélation et donc de prendre en compte la non gaussianité. Mais quel est le lien entre ces trois notions ? Pour l'exprimer, il faut définir quantitativement ces deux dernières, la première étant mesurée par $I(Y)$.

Définissons d'abord la « corrélation » $C(Y)$ d'un vecteur aléatoire comme l'information mutuelle de son approximation gaussienne : $C(Y) = I(Y^G)$ où Y^G est un vecteur gaussien ayant les mêmes moments d'ordres 1 et 2 que Y . Cette corrélation ne dépend que de la matrice de covariance R_Y de Y et mesure en fait l'écart de R_Y à la diagonalité. C'est, en quelque sorte, la « partie gaussienne » de la dépendance $I(Y)$. Définissons ensuite la (non)-gaussianité $G(Y)$ d'un vecteur (éventuellement de dimension 1) comme la divergence $G(Y) = D(P_Y | P_{Y^G})$ entre sa distribution P_Y et celle de sa meilleure approximation gaussienne, qui est la distribution de Y^G .

Tandis que P_{Y^G} est la meilleure approximation gaussienne de la distribution P_Y du vecteur Y , sa meilleure approximation indépendante n'est autre que $\prod_i P_{Y_i}$. L'approximation gaussienne de l'approximation indépendante (ou vice versa) est $\prod_i P_{Y_i^G}$. Cette distribution gaussienne à composantes indépendantes ne ressemble à P_Y qu'en ce que chacune de ses marginales possède les mêmes moments d'ordre 1 et 2 que la marginale correspondante de P_Y .

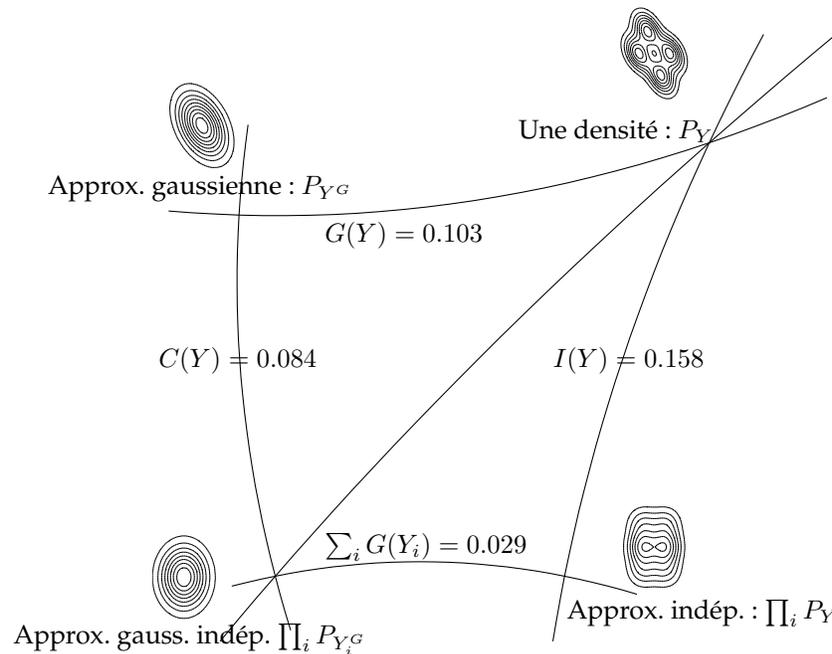


FIG. 1 – Liens géométriques entre indépendance, corrélation et gaussianité. Une distribution de probabilité P_Y et sa 'projection' en $\prod_i P_{Y_i}$ sur la famille de distributions indépendantes et en P_{Y_G} sur la famille des distributions gaussiennes. Un théorème de Pythagore dans l'espace des distributions et une 'hypoténuse' commune suggèrent que $I(Y) + \sum_{i=1}^n G(Y_i) = C(Y) + G(Y)$.

Un exemple bidimensionnel ($n = 2$) en est donné par la figure 1 qui illustre une construction de la « géométrie de l'information ». Cette construction permet de deviner le lien entre corrélation et dépendance :

$$I(Y) = C(Y) - \sum_{i=1}^n G(Y_i) + G(Y).$$

Leur différence est aussi celle entre gaussianité $G(Y)$ de la loi jointe de Y et la somme $\sum_{i=1}^n G(Y_i)$ des gaussianités de chaque loi marginale.

Si l'on remarque que la gaussianité d'un vecteur est constante sous transformation linéaire inversible : $G(Y) = G(BX) = G(X)$, on aboutit à un point-clé : dans la recherche de composantes linéaires, minimiser la dépendance $I(Y)$, c'est poursuivre à la fois une corrélation $C(Y)$ minimale et une non-gaussianité maximale $G(Y_i)$ de chaque composante.

ACI et projection poursuite.

L'A.C.I est connectée, en tant que méthode d'exploration de données, aux idées de la « projection-poursuite » (PP). En projection-poursuite, on cherche des directions « intéressantes » dans un nuage de données n -dimensionnelles en arguant du fait que les structures intéressantes sont celles qui, dans la direction d'un vecteur u , font apparaître le plus de non gaussianité. Autrement dit, on cherche une direction u « intéressante » comme solution de $\max_u G(u^\dagger X)$. Dans l'approche PP, on extrait itérativement des composantes intéressantes, maximale-ment non gaussiennes et orthogonales aux composantes déjà extraites. On voit donc que la minimisation du critère de dépendance $I(Y)$ accomplit un programme très semblable, mais dans une formulation globale : maximisation des non gaussianités de chaque composante $\sum_i G(Y_i)$ pondérée d'un terme d'orthogonalité statistique $C(Y)$.

Conclusion.

La *diversité* qu'offre un *ensemble* de capteurs ouvre des voies originales au traitement des données de toutes sortes. Un modèle simple —la superposition de sources indépendantes— permet d'extraire « à l'aveuglette » ces sources élémentaires, cachées (peut-être) dans les observations. Pour y parvenir, il faut faire jouer l'hypothèse d'indépendance au delà de la simple notion de décorrélation, ce qui implique de comprendre le rôle de la non gaussianité. Il s'avère que, sous les transformations linéaires, la mesure naturelle de dépendance contient deux ingrédients (plus une constante, ici sans intérêt) : une mesure globale de corrélation et une mesure de la gaussianité de chaque composante. On en déduit une maxime : pour séparer à l'aveuglette des sources indépendantes dans un mélange, on peut chercher la décorrélation en y ajoutant une pincée de non gaussianité. On fait en quelque sorte, marcher à l'envers le théorème de la limite centrale : si sommer (mélanger) des variables aléatoires indépendantes tend à les « gaussianiser », alors chercher des combinaisons dégaussianisées tend à produire des variables « pures », les sources élémentaires.

Ressources

La place manquant pour plus de détail, des exemples et des références, nous dirigeons le lecteur intéressé vers quelques sites Internet où ils trouveront des articles introductifs, des algorithmes et d'autres pointeurs. Il s'agit du site de l'auteur, celui de l'équipe ACI à l'Université d'Helsinki et de celle du Salk Institute à San Diego :

<http://tsi.enst.fr/~cardoso/stuff.html>
<http://www.cis.hut.fi/projects/ica/>
<http://www.cnl.salk.edu/~tewon/ICA/display.html>

Quelques résultats sur le sixième problème de Hilbert

Laure Saint-Raymond

*Laboratoire J.-L. Lions UMR 7598
Université Paris VI
175, rue du Chevaleret, 75013 Paris, France
saintray@ann.jussieu.fr*

On se propose ici de faire une présentation tout à fait générale du problème de limites fluides posé par D. Hilbert au congrès international de mathématiques de 1900 [7], ainsi que des résultats mathématiques qui font suite à la contribution fondamentale de C. Bardos, F. Golse et D. Levermore [2].

1. Signification physique du problème de limites fluides

Du point de vue physique, le problème de limites fluides consiste à comprendre les liens entre les différentes modélisations, ou plus exactement entre les différents niveaux de modélisation d'un fluide.

1.1. Les modèles classiques

introduits par Euler au XVIII-ème siècle pour les fluides non visqueux, puis par Navier et Stokes au XIX-ème siècle pour les fluides visqueux, permettent de décrire des milieux "continus". Cette description se fait à l'aide d'un petit nombre de variables qui sont des grandeurs thermodynamiques mesurables (densité, vitesse moyenne d'écoulement, température...). L'évolution du fluide est alors régie par un système d'équations aux dérivées partielles traduisant la conservation locale de la masse, de l'impulsion et de l'énergie, système que l'on ferme en prescrivant une relation d'état. L'approche consiste donc à considérer un élément de volume infinitésimal et à écrire les équations de bilan pour cette "particule fictive".

Cette approche macroscopique phénoménologique est en fait compatible avec la dynamique microscopique des particules du fluide dans une certaine limite (dite de relaxation rapide).

1.2. À l'échelle microscopique

le fluide est en fait constitué d'un grand nombre de particules en interaction, dont la dynamique est régie par le principe fondamental de Newton. Les collisions entre ces particules induisent un mécanisme de relaxation : si elles sont suffisamment fréquentes, on peut considérer que l'équilibre thermodynamique est atteint partout presque instantanément. L'équation de contrainte ainsi obtenue donne la relation d'état du fluide. Les grandeurs thermodynamiques sont alors

les moyennes des grandeurs microscopiques correspondantes, et les équations d'évolution macroscopiques sont obtenues en moyennant les équations microscopiques.

1.3. Dans le cas des gaz parfaits

le volume occupé par les particules est négligeable devant le volume du fluide. On peut alors considérer que les seules collisions déterminantes pour l'évolution du fluide sont les collisions entre deux particules qui n'ont jamais interagi dans le passé (les autres collisions, multiples ou entre particules corrélées, étant de probabilité négligeable). On décrit alors le système microscopique par une approche probabiliste, à l'aide de sa densité dans l'espace des phases $f \equiv f(t, x, v)$ (première marginale de la fonction de distribution). Cette fonction, qui donne le nombre de particules $f(t, x, v)dx dv$ de position x et de vitesse v à l'instant t , satisfait une équation d'évolution cinétique de type Boltzmann.

Le problème de limites fluides posé par Hilbert se décompose alors en deux sous-problèmes, celui de la dérivation de l'équation de Boltzmann à partir de la mécanique du système de particules (problème résolu en temps petit pour des données très régulières par O. Lanford en 1974 [8]), et celui des limites hydrodynamiques de l'équation de Boltzmann dont il est question ici. On notera toutefois que les réponses apportées à ces deux problèmes ne permettent pas pour l'instant de donner une solution satisfaisante au problème global.

2. Principaux éléments du problème mathématique

2.1. L'étude formelle des limites hydrodynamiques

de l'équation de Boltzmann remonte à D. Hilbert pour les gaz parfaits non visqueux, et à Chapman et Enskog pour les gaz parfaits faiblement visqueux (la viscosité d'un gaz parfait est nécessairement petite puisque la taille des particules est négligeable). Elle repose sur les propriétés fondamentales de l'équation de Boltzmann :

$$Ma\partial_t f + v \cdot \nabla_x f = \frac{1}{Kn} Q(f)$$

qui prend en compte d'une part le transport des particules (membre de gauche) et d'autre part la modification des vitesses par les collisions (membre de droite) qui sont supposées instantannées et élastiques. Les propriétés de symétrie sur l'opérateur Q ainsi obtenu (opérateur intégral par rapport à la variable v) impliquent en particulier la conservation locale de la masse $\rho = \int f dv$, de l'impulsion $\rho u = \int f v dv$ et de l'énergie $\frac{1}{2}\rho(u^2 + 3T) = \frac{1}{2} \int f v^2 dv$, ainsi que la croissance locale de l'entropie $\rho S = - \int f \log f dv$. Les maximiseurs de l'entropie à masse, impulsion et énergie fixées (qui sont aussi les annulateurs de l'opérateur Q) sont les distributions gaussiennes conformément à la prédiction statistique de Boltzmann.

Lorsque le nombre de Knudsen Kn (qui mesure le rapport du libre parcours moyen à la longueur d'observation) est petit, l'opérateur de collisions Q est pénalisé de sorte qu'asymptotiquement on s'attend à ce que la densité f satisfasse la relation d'état $Q(f) = 0$. La gaussienne M_f définie par

$$M_f(t, x, v) = \frac{\rho(t, x)}{(2\pi T(t, x))^{3/2}} \exp\left(-\frac{|v - u(t, x)|^2}{2T(t, x)}\right)$$

fournit une bonne approximation de f . Le système hydrodynamique sur les grandeurs thermodynamiques ρ , u et T est alors obtenu en écrivant les conservations locales de masse, impulsion et énergie. Les flux sont calculés en utilisant le développement asymptotique de la densité

$$f = M_f + Kn v \cdot \nabla_x M_f + \dots$$

2.2. Les différents régimes hydrodynamiques

sont caractérisés par les deux nombres sans dimension Kn et Ma [1]. La compressibilité du fluide est mesurée par le nombre de Mach, défini comme le rapport de la vitesse d'écoulement à la vitesse du son (vitesse d'agitation thermique). Si $Ma \sim 1$, l'écoulement est compressible. Si $Ma \ll 1$, l'écoulement est incompressible (au moins en première approximation). La viscosité du fluide est inversement proportionnelle au nombre de Reynolds Re qui vérifie la relation de Von Karman (pour les gaz parfaits) : $Re = Ma/Kn$. Si $Ma \sim Kn$, l'écoulement est visqueux. Si $Ma \gg Kn$, l'écoulement est non visqueux (au moins en première approximation).

Selon les tailles respectives des nombres de Mach et de Knudsen, on va donc obtenir différents modèles hydrodynamiques (équations d'Euler compressibles si $Kn \ll 1 \sim Ma$, équations d'Euler incompressibles si $Kn \ll Ma \ll 1$ [4,11] ou équations de Navier-Stokes incompressibles si $Kn \sim Ma \ll 1$ [5, 6]). L'étude mathématique de chacune de ces asymptotiques est très similaire à celle du modèle limite correspondant : c'est donc en régime incompressible et visqueux que le processus de limite hydrodynamique est le mieux compris actuellement.

2.3. Les principales difficultés

rencontrées pour rendre rigoureuse la dérivation formelle esquissée précédemment sont en fait liées à la physique du système.

Le premier problème consiste à obtenir un contrôle sur les particules de haute énergie : il faut vérifier que les particules de grande vitesse ne sont pas "perdues", c'est-à-dire qu'il n'y a pas de déperdition d'énergie transportée par des particules qui s'échapperaient quasiment instantanément du domaine d'observation. En termes mathématiques, un tel phénomène se traduirait par une perte de compacité en vitesses sur la fonction de distribution f , ou plus exactement sur son deuxième moment $f|v|^2$. Les estimations a priori qui excluent un tel scénario sont

donc des estimations plus fines que les bornes usuelles d'entropie et d'énergie, elles proviennent de la borne sur la dissipation d'entropie qui permet essentiellement de montrer que la fonction de distribution f a, en régime hydrodynamique, "presque" la même régularité par rapport à la variable v que sa Maxwellienne associée M_f .

Le passage à la limite dans les équations de moments nécessite d'autre part une étude précise des oscillations du système. Premièrement il faut vérifier qu'il n'y a pas d'effet turbulent à l'échelle microscopique, c'est-à-dire de comportement oscillatoire sur des longueurs de l'ordre du libre parcours moyen qui déstabiliserait l'ensemble du fluide par un effet de résonance. L'absence d'oscillations en espace s'obtient au niveau mathématique par de la "compacité par rapport à la variable x " : les lemmes de moyenne montrent en effet que l'estimation sur le terme d'advection $Ma\partial_t f + v \cdot \nabla_x f$ donne de la régularité sur les grandeurs thermodynamiques, qui sont des moyennes de la fonction de distribution. De la même façon, le système pourrait être déstabilisé par des oscillations temporelles (sur des échelles de temps de l'ordre du nombre de Mach). De telles oscillations existent bien dans le fluide, ce sont les ondes acoustiques qui prennent en compte notamment la compressibilité du fluide. Il faut alors vérifier qu'elles ne produisent pas d'interférence constructive. Pour cela, on est amené à décrire précisément la propagation des ondes, et leur couplage dans les équations de moments : un argument de compacité par compensation, dû à P.-L. Lions et N. Masmoudi [9], permet alors de conclure qu'elles ne jouent pas de rôle sur l'écoulement moyen, et que par conséquent elles n'interviennent pas dans le système hydrodynamique limite.

D'autres difficultés apparaissent, dues en particulier à la notion très faible de solution que l'on utilise [3]. Elles conduisent à un certain nombre de démonstrations techniques, typiquement pour estimer les défauts de conservation [5, 10]. On notera cependant que même si l'on disposait de solutions plus régulières, n'ayant pas de bornes uniformes autres que celles fournies par l'inégalité d'entropie, on ne pourrait pas simplifier beaucoup la dérivation mathématique des limites hydrodynamiques.

3. Quelques applications possibles

Outre un défi mathématique, l'étude rigoureuse des limites hydrodynamiques est donc un moyen de comprendre les phénomènes physiques fins qui ont lieu dans les régimes quasiment hydrodynamiques. Elle trouve donc des applications directes dans le développement des technologies qui nécessitent des simulations numériques précises.

3.1. En aéroacoustique par exemple

on doit simuler l'écoulement de l'air (qui peut être considéré comme un gaz parfait en première approximation) pour évaluer les répercussions du déplacement d'un avion sur l'environnement, et prendre les mesures nécessaires pour limiter

les nuisances (construction de murs anti-bruit). Un code qui utiliserait un modèle particulière dans tout l'espace serait beaucoup trop lourd à mettre en œuvre. Inversement, un code hydrodynamique ne permettrait pas de prendre en compte de façon suffisamment précise les conditions aux bords (au contact de l'avion). Une alternative consiste donc à découper l'espace en trois zones : un domaine fin le long des parois de l'avion (dont la taille dépend essentiellement du libre parcours moyen) où l'on décrit la dynamique des particules constituant l'air, une zone au voisinage de l'avion (dont la taille dépend de la vitesse de l'avion) où l'on utilise un modèle hydrodynamique incompressible, au moins si la vitesse de l'avion est subsonique. A l'extérieur de ces deux zones, un modèle de propagation des ondes acoustiques suffit. Les relations de compatibilité obtenues dans l'étude des limites hydrodynamiques donnent alors les couplages adaptés aux bords des différents domaines.

3.2. D'autres domaines

bénéficieraient d'une étude plus étendue. Ainsi la simulation des écoulements sanguins offre des perspectives intéressantes en médecine. Bien sûr, pour ce type d'écoulements, l'approximation de gaz parfaits est très fautive : le volume occupé par les particules (les globules) n'est pas du tout négligeable. Il faudrait donc être capable de dériver des modèles hydrodynamiques pour des fluides où les interactions microscopiques sont déjà très complexes. Une première étape consiste donc à caractériser les états d'équilibre associés à ces interactions, et à comprendre formellement la dynamique macroscopique induite.

Références

- [1] C. Bardos, F. Golse, and D. Levermore, *Fluid Dynamic Limits of Kinetic Equations I : Formal Derivations*, J. Stat. Phys. **63** (1991), 323–344.
- [2] C. Bardos, F. Golse, and C.D. Levermore, *Fluid Dynamic Limits of Kinetic Equations II : Convergence Proofs for the Boltzmann Equation*, Commun. Pure & Appl. Math **46** (1993), 667–753.
- [3] R.J. DiPerna and P.-L. Lions, *On the Cauchy Problem for the Boltzmann Equation : Global Existence and Weak Stability Results*, Annals of Math. **130** (1990), 321–366.
- [4] F. Golse, in *Kinetic Equations and Asymptotic Theory*, B. Perthame and L. Desvillettes eds., Series in Applied Mathematics **4**, Gauthier-Villars, Paris, 2000.
- [5] F. Golse, L. Saint-Raymond, *The Navier-Stokes limit of the Boltzmann equation for bounded collision kernels*, Invent. Math. **155** (2004), 81-161.
- [6] F. Golse, L. Saint-Raymond, *The incompressible Navier-Stokes limit of the Boltzmann equation for hard potentials*, en préparation (2004).
- [7] D. Hilbert, *Mathematical Problems*, International Congress of Mathematicians, Paris 1900, translated and reprinted in Bull. Amer. Math. Soc. **37** (2000), 407-436.

- [8] O. Lanford *Time evolution of large classical systems*, in “Dynamical systems, theory and applications” (Rencontres, Battelle Res. Inst., Seattle, Wash., 1974), pp. 1–111. Lecture Notes in Phys., Vol. 38, Springer, Berlin, 1975.
- [9] P.-L. Lions, N. Masmoudi, *From Boltzmann Equations to Navier-Stokes Equations I*, *Archive Rat. Mech. & Anal.* **158** (2001), 173–193.
- [10] P.-L. Lions, N. Masmoudi, *From Boltzmann Equations to the Stokes and Euler Equations II*, *Archive Rat. Mech. & Anal.* **158** (2001), 195–211.
- [11] L. Saint-Raymond, *The incompressible Euler limit of the Boltzmann equation : convergence proof*, *Archive Rat. Mech. & Anal.* **166** (2003), 47–80.

Ondelettes et Imagerie Médicale

Valérie Perrier

Laboratoire de Modélisation et Calcul de l'IMAG
Institut National Polytechnique de Grenoble
Valerie.Perrier@imag.fr

1. Introduction

L'imagerie médicale a révolutionné les pratiques médicales. Néanmoins, de nombreux problèmes liés au traitement d'image y sont encore ouverts et leur résolution (même partielle) peut aboutir à une amélioration de la médecine. On peut citer par exemple : le problème de la réduction des radiations administrées lors d'un examen scanner (tomographie locale), la chirurgie assistée par ordinateur (segmentation automatique et reconstruction temps-réel 3D), ou encore la détection et l'analyse de structures malignes dans des données d'échographie, mammographie, ou spectroscopie RMN (analyse d'images texturées) etc..

L'utilisation des ondelettes en traitement d'images s'est généralisée durant les vingt dernières années. Leur intérêt pour la compression et le débruitage a été démontré puisqu'elles ont intégré le dernier standard de compression des images numériques JPEG 2000. Leur application à l'imagerie médicale date de 1992 et s'est largement répandue depuis [1, 2]. Dans ce contexte les ondelettes sont utilisées pour la compression et le débruitage, mais aussi pour l'analyse fonctionnelle de données médicales (en vue d'établir un diagnostic), la tomographie locale, la segmentation et le rehaussement d'images, ou encore la description de textures.

Nous nous intéresserons ici à l'imagerie scanner. L'avènement du scanner a permis de fournir des informations pré-opératoires précises sur le patient qui servent à la fois à établir un diagnostic, à élaborer un planning chirurgical mais aussi à guider le chirurgien. Toutefois l'examen scanner, s'il est efficace pour la reconstruction 3D de structures anatomiques, est un examen invasif, donc nocif pour la santé. Dans tous les cas, l'objectif médical sera de réduire au minimum les radiations administrées au patient.

2. Principe de fonctionnement d'un scanner

Le principe de fonctionnement d'un scanner est celui de l'acquisition de radiographies sur des détecteurs, positionnés autour de l'objet à étudier (figure 1). Les géométries d'acquisition peuvent être différentes suivant les types d'appareils : acquisition circulaire à géométrie parallèle (les faisceaux de rayons X arrivant sur les détecteurs sont parallèles) ou à géométrie cônica, acquisition hélicoïdale, etc. Les données scanner sont des coupes radiographiques, qui correspondent mathématiquement à la transformée de Radon de la fonction d'atténuation, mesurée sur chaque détecteur. En dimension 2 d'espace, la **transformée de Radon** de la

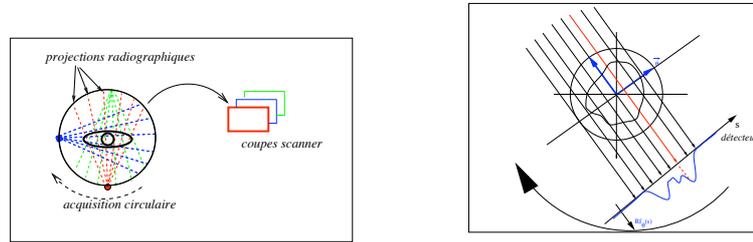


FIG. 1 – Le principe de fonctionnement d'un scanner : acquisition circulaire de radiographies autour de la section d'intérêt (à gauche), et principe de mesure de la transformée de Radon sur une radiographie (à droite, les lignes représentent les droites $L_{\theta,s}$).

fonction d'atténuation $f(x)$ sur un détecteur correspond à la moyenne de f le long des droites $L_{\theta,s}$ (cf figure 1) :

$$\mathcal{R}_\theta f(s) = \int_{L_{\theta,s}} f(x) dl = \int_{-\infty}^{+\infty} f(s\vec{\theta} + t\vec{\theta}^\perp) dt$$

où $\vec{\theta} = (\cos \theta, \sin \theta)$ et $\vec{\theta}^\perp = (-\sin \theta, \cos \theta)$.

Pour reconstruire une structure anatomique en dimension 2 à partir de ses projections, on doit inverser la transformée de Radon. La formule d'inversion classique, et utilisée en pratique, fait appel à la transformée de Fourier, c'est la formule de *rétro-projection filtrée* [14] :

$$f(x) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{\mathcal{R}_\theta f}(\omega) |\omega| e^{2i\pi x \cdot \vec{\theta}} d\omega d\theta, \quad \forall x \in \mathbb{R}^2 \quad (1)$$

(où la notation \hat{g} désigne la transformée de Fourier d'une fonction unidimensionnelle g).

L'inconvénient de cette formule est que la reconstruction de la fonction en un point nécessite la connaissance de la transformée de Radon sur tous les détecteurs. Ainsi le scanner est une solution efficace mais trop invasive et souvent non praticable en cours d'intervention (à cause de l'encombrement de l'appareil et de l'intensité des radiations). L'objectif consiste alors à développer de nouvelles méthodes de reconstruction moins invasives, soit en cherchant des formules de reconstruction locale pour remplacer (1), soit en se tournant vers des solutions différentes (et n'utilisant pas le scanner).

3. Ondelettes et Tomographie locale

Le problème se pose de la reconstruction d'une structure 2D, à partir de données tronquées de sa transformée de Radon. Nous ne considérerons que le *problème*

intérieur : comment reconstruire une fonction $f(x)$ en tout point du disque $\|x\| < a$ (appelé *Région d'Intérêt*), à partir de ses projections $\mathcal{R}_\theta f(s)$ pour $|s| < a$ et $\theta \in [0, 2\pi]$? (ce qui correspond à reconstruire f dans la région d'intérêt en irradiant uniquement cette région).

En dimension 2 d'espace, ce problème est mathématiquement mal posé, car il n'y a pas unicité de la solution. Toutefois, on peut montrer que deux solutions diffèrent à peu près d'une constante, dans un disque un peu plus petit que la région d'intérêt [14]. On se tourne alors vers des méthodes de reconstruction qui ne nécessitent pas des données complètes.

L'introduction des ondelettes en tomographie locale date de 1994 (voir par exemple [3]). L'approche par ondelettes/vaguelettes, introduite en 1995 par Donoho [6], est certainement la méthode la plus utilisée actuellement pour la résolution de problèmes inverses [12]. Nous nous intéresserons ici à l'approche proposée par Holschneider [9] qui est de nature complètement différente : cette approche consiste à inverser la transformée de Radon (globale), en la considérant comme une transformée en ondelettes particulière dans un espace de distributions.

La décomposition en ondelettes 2D directionnelle d'une fonction f , contre une ondelette d'analyse g , est définie par :

$$W_g f(a, b, \varphi) = \int_{\mathbb{R}^2} f(x) \frac{1}{a} \bar{g}(r_{-\varphi} \left(\frac{x-b}{a} \right)) dx, \quad \forall a > 0, b \in \mathbb{R}^2, \varphi \in [0, 2\pi]$$

où $r_{-\varphi}$ désigne la rotation d'angle $-\varphi$.

En introduisant alors une ondelette de reconstruction h , cette formule peut s'inverser par la formule de **synthèse** suivante :

$$f(x) = \frac{1}{c_{gh}} \int_0^{+\infty} \int_{\mathbb{R}^2} \int_0^{2\pi} W_g f(a, b, \varphi) \frac{1}{a} h(r_{-\varphi} \left(\frac{x-b}{a} \right)) \frac{da}{a^3} db d\varphi.$$

Le cadre fonctionnel naturel pour la transformée en ondelettes est $L^2(\mathbb{R}^2)$, et de plus les fonctions g et h doivent vérifier une condition d'*admissibilité* (correspondant à $c_{gh} < +\infty$).

Inversion locale de la transformée de Radon :

Pour une certaine classe de fonctions f , la transformée en ondelettes peut être étendue à des ondelettes d'analyse *distributions*. En considérant comme ondelette d'analyse, la distribution :

$$g = \delta(x_1)1(x_2) : f \in \mathcal{D}(\mathbb{R}^2) \mapsto \langle g, f \rangle = \int_{\mathbb{R}} f(0, x_2) dx_2$$

la formule d'inversion de la transformée en ondelettes fait intervenir explicitement la transformée de Radon de f :

$$f(x) = \frac{1}{c_{gh}} \int_0^{+\infty} \int_{\mathbb{R}^2} \int_0^{2\pi} \mathcal{R}_\theta f(b, \vec{\theta}) \frac{1}{a} h(r_{-\theta} \left(\frac{x-b}{a} \right)) \frac{da}{a^3} db d\theta \quad (2)$$



FIG. 2 – Le fantôme de Shepp Logan : image originale (à gauche), reconstruction par la formule d’inversion utilisant les ondelettes (au centre), coupe horizontale au milieu de l’image (à droite) [4]. Le changement d’intensité dans les niveaux de gris s’explique par la perte de la valeur moyenne de l’image.

où h doit vérifier $c_{gh} = \int_{\mathbb{R}} \frac{\hat{h}(k_1, 0)}{|k_1|^2} dk_1 < +\infty$, i.e. h a 2 moments nuls dans la direction x_1 .

On peut alors utiliser dans les calculs de reconstruction une ondelette h classique, c’est à dire une fonction à décroissance rapide, et possédant deux moments nuls, comme par exemple le Laplacien de la Gaussienne,

$$h(x) = \Delta e^{-\|x\|^2/2} = (\|x\|^2 - 2)e^{-\|x\|^2/2}.$$

Dans ce cas, la formule (2) est bien adaptée pour le *problème intérieur* : pour reconstruire $f(x)$ en un point x appartenant à la région d’intérêt, il suffit de modifier dans la formule (2), les domaines d’intégration sur les échelles a et sur les positions b , de façon à ne considérer que les ondelettes $h(\frac{x-b}{a})$ dont le “support” contient x . Il reste des problèmes théoriques à examiner, en particulier celui de la stabilité de l’opérateur local, suivant le type de fonction que l’on souhaite analyser. Des résultats préliminaires satisfaisants de reconstruction, sur le cas test du fantôme de Shepp Logan, sont présentés à la figure 2.

4. Reconstruction en temps réel de surfaces 3D

Dans de nombreuses applications, l’utilisation de techniques d’imagerie interventionnelle peut apporter l’avantage, parfois crucial, d’une information sur le patient tel qu’il est lors de l’intervention et non tel qu’il était dans les conditions de l’imagerie pré-opératoire. Pour réduire le caractère invasif de l’imagerie, d’autres solutions que le scanner sont envisagées. En collaboration avec le laboratoire TIMC, nous nous intéressons à la mise en place d’un module d’assistance par ordinateur en chirurgie orthopédique, dans le cas du vissage pédiculaire (visage d’une vis dans le pédicule d’une vertèbre). L’objectif est de guider le chirurgien au cours de l’intervention, en lui proposant une navigation en temps réel de ses instruments dans une vue tridimensionnelle de la vertèbre. L’intervention est supposée se dérouler sous fluoroscopie, c’est à dire que l’on dispose à tout

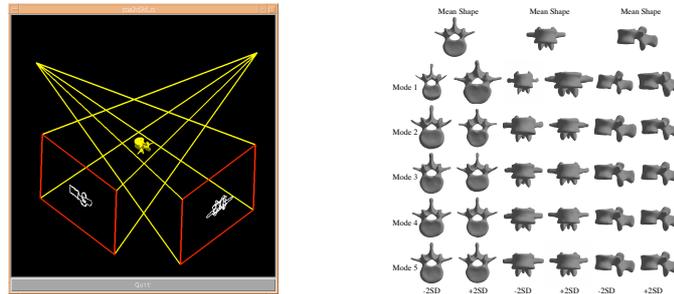


FIG. 3 – Reconstruction d’une surface 3D de vertèbre à partir de 2 radiographies segmentées (à gauche), et d’une base de données de vertèbre à laquelle on associe une forme de surface moyenne et des modes de déformation (à droite)[7].

moment, de deux radiographies de la vertèbre prises de face et de profil. Il s’agit alors, à partir de ces deux radiographies, de reconstruire la vertèbre en trois dimensions.

La méthodologie mise au point par Laurent Desbat et Markus Fleute consiste à utiliser un modèle statistique de formes pour la reconstruction de surfaces de vertèbres [7, 8]. Ce modèle statistique est capable de reconstruire une surface 3D à partir des contours extérieurs de la vertèbre sur les deux radiographies, et d’une base de données de surfaces de vertèbres (schématisée à la figure 3). Jusqu’alors, ces contours étaient déterminés à la main par le praticien, ce qui n’est pas admissible au cours d’une intervention. Notre travail consiste à définir et implémenter en temps-réel une méthode automatique de détection de contours, adaptée aux images radiographiques.

L’identification des contours extérieurs d’un objet dans une image est un problème fondamental de traitement d’image. Pour le résoudre nous procédons en deux étapes :

- Dans un premier temps, les contours, qui correspondent aux brusques variations de l’intensité, sont modélisés comme des courbes reliant des points qui sont des maxima locaux du gradient de l’intensité le long des lignes de courant du gradient. Chacune de ces courbes suit une direction orthogonale au gradient de l’intensité, et est caractérisée par une régularité lipschitzienne variant peu. Ce paramètre de régularité va permettre de classifier les différentes courbes obtenues. L’outil mathématique adapté pour définir ces courbes, est une transformée en ondelettes bidimensionnelle continue, utilisant comme ondelette d’analyse un gradient de Gaussienne, associée à la technique de suivi des lignes de maxima des coefficients d’ondelettes [13].

La méthode de détection et de classification des contours qui a été ainsi définie et implémentée [10] donne de très bons résultats sur une radiographie de vertèbre sèche (vertèbre isolée) comme le montre la figure 4. Mais en conditions réelles

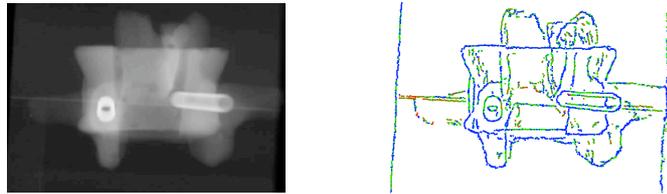


FIG. 4 – Radiographie d'une vertèbre sèche, détection et classification par la couleur des contours [10].

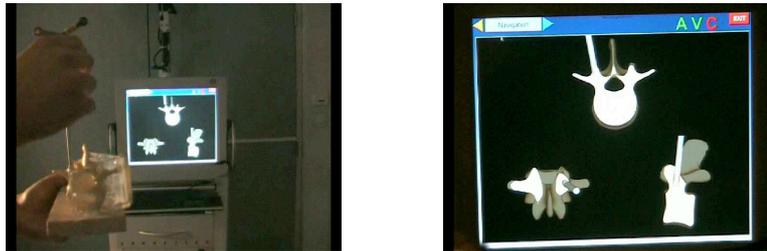


FIG. 5 – La station de navigation et la reconstruction 3D de la surface de la vertèbre, obtenue par le modèle statistique de formes, à partir des segmentations par ondelettes des deux radiographies.

(radiographie prise sur un patient), l'algorithme ne permet de délimiter que quelques morceaux de contours pertinents.

- Dans un deuxième temps, pour pouvoir travailler en conditions réelles, nous incorporons une méthode de contours actifs [5, 15] pour permettre de déterminer l'ensemble du contour extérieur de la vertèbre. L'énergie du contour pourra être calculée directement à partir des coefficients d'ondelettes sélectionnés dans l'algorithme précédent, et l'initialisation du contour actif sera donnée par la projection d'une surface 3D approchée de la vertèbre, fournie par le modèle statistique.

L'intégration de la méthode de segmentation par ondelettes, associée au modèle statistique de formes, a pu être effectuée dans la station de navigation et est opérationnelle dans le cas de la vertèbre sèche [11] (figure 5).

Remerciements : Ce travail, mené en collaboration avec Laurent DESBAT, du Laboratoire de Techniques de l'Imagerie, de la Modélisation, et de la Cognition (TIMC) de l'IMAG, et Anne Bilgot et Olivier Le-Cadet, doctorants, a reçu le soutien de la Région Rhône-Alpes.

Références

- [1] *Wavelets in Medicine and Biology*, A. Aldroubi and M. Unser eds, CRC Press, 1996.
- [2] *Special issue on "Wavelets in Medical Imaging"*, M. Unser, A. Aldroubi and A. Laine eds, IEEE Transactions on Medical Imaging, vol.22, no. 3, mars 2003.
- [3] C. Berenstein, D. Walnut, Local inversion of the radon transform in even dimensions using wavelets, In *75 years of Radon Transform*, S. Gindikin and P. Michor eds, 45–69. International Press, Cambridge, MA (1994).
- [4] A. Bilgot, Méthodes d'ondelettes pour la radiologie numérique et la reconstruction 3D, *Rapport d'activité 2ème année*, Région Rhône Alpes, (2003).
- [5] L. Cohen, On active contours and balloons, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing : Image Understanding (CVGIP :IU)*, **53**(2) :211–218, (1991)
- [6] D.L. Donoho, Nonlinear solution of linear inverse problems by wavelet / vaguelette decomposition,, *Appl. Comput. Harm. Anal.* **2** : 101–126 (1995).
- [7] M. Fleute, Shape reconstruction for computer assisted surgery based on non-rigid registration of statistical models with intra-operative point data and X-ray images, *Thèse de l'Université Joseph Fourier*, Grenoble I, 2001.
- [8] M. Fleute, L. Desbat, R. Martin, S. Lavallée, M. Defrise, X. Liu et R. Taylor, Statistical model registration for a C-arm CT system, *IEEE NSSMIC2001*, abstract book pp. 112, San Diego, 2001.
- [9] M. Holschneider, Inverse Radon Transform through inverse wavelet transform, *Inverse problems*, **7**, 853–861 (1991).
- [10] O. Le Cadet, Méthodes d'ondelettes pour la segmentation d'images médicales, *Rapport d'activité 3ème année*, Région Rhône Alpes, (2003).
- [11] O. Le Cadet, A. Bilgot, V. Perrier et L. Desbat, " Edge detection and classification using wavelets : an application to interventional X-Ray" , Int. Conf. *Wavelets and Statistics*, Villard de Lans, septembre 2003.
- [12] N. Lee, B. Lucier, Wavelet methods for inverting the Radon Transform with noisy data, *IEEE Trans. Image Processing* ,**10**, (2001).
- [13] S. Mallat and S. Zhong, Characterization of signals from multiscale edges, *IEEE Transactions on Pattern analysis and machine intelligence*, vol. 14, no. 7, 710-732, 1992.
- [14] F. Natterer, *The mathematics of computerized tomography*, Wiley (1986).
- [15] H.-H. Wu, J.-C. Liu and C. Chui, A wavelet-frame based image model for active contouring algorithms, *IEEE Trans. Image Processing* **9**(11), 1983–1988 (2000).

Message de Madame Claudie Haigneré

Ministre déléguée à la Recherche et aux Nouvelles Technologies

A l'occasion de la Cérémonie en l'honneur des lauréats des prix d'informatique et de mathématiques appliquées attribués en 2003 par l'Académie des Sciences, Le 28 novembre 2003

"J'aurais très vivement souhaité pouvoir participer, à votre invitation, à la cérémonie en l'honneur des lauréats des prix d'informatique et de mathématiques appliquées attribués en 2003 par l'Académie des Sciences.

Malheureusement, les contraintes de mon agenda ne me permettent pas de m'associer à vous aujourd'hui comme j'en avais eu précédemment l'intention. Croyez que j'en suis particulièrement désolée, car de telles cérémonies sont toujours pour moi la source d'une grande satisfaction : célébrer ainsi l'intelligence, le dynamisme, la réussite de nos meilleurs chercheurs est un des plus précieux témoignages de la vitalité de notre recherche, de nos institutions, et de ceux qui les animent.

Le parcours exceptionnel des cinq lauréats que vous avez choisi d'honorer force l'admiration, et je tiens à leur adresser à tous mes plus chaleureuses félicitations pour l'excellence de leur travaux. En cette année anniversaire de l'attribution du prix Nobel de physique à Marie Curie, dont la commémoration nous incite à célébrer et à promouvoir la place des femmes dans la vie scientifique de notre pays, vous me permettrez de mentionner tout particulièrement les remarquables contributions de Mesdames Valérie Perrier et Laure Saint-Raymond pour le rayonnement de la science mathématique française. Je forme le vœux que de tels parcours, menés à un si haut niveau, de façon si précoce et avec tant de réussite, aient valeur d'exemple pour les jeunes, et tout spécialement pour les jeunes femmes qui sont encore trop rares à mener des carrières scientifiques.

Recevez, Mesdames et Messieurs, mes encouragements les plus vifs pour la suite de vos travaux, dont je suis persuadée que vous les accomplirez avec la même passion et le même succès que ceux qui vous valent aujourd'hui cet hommage mérité."

CORRESPONDANTS RÉGIONAUX

- Aix-Marseille** *Jacques Liandrat*
LATP EGIM
BP 142
13383 MARSEILLE Cedex 13
Tél. : 04 91 11 85 40/04 - Fax : 04 91 11 85 02
liandrat@marius.univ-mrs.fr
- Amiens** *Alberto Farina*
LAMFA
Université de Picardie Jules Verne
33 rue Saint Leu
80039 AMIENS Cedex
Tél. : 03 22 82 75 88 - Fax : 03 22 82 75 02
Alberto.Farina@u-picardie.fr
- Antilles-Guyane** *Marc Lassonde*
Mathématiques
Université des Antilles et de la Guyane
97159 POINTE A PITRE
Marc.Lassonde@univ-ag.fr
- Avignon** *Alberto Seeger*
Département de Mathématiques
Université d'Avignon
33 rue Louis Pasteur - 84000 AVIGNON
Tél. 04 90 14 44 93 - Fax 04 90 14 44 19
alberto.seeger@univ-avignon.fr
- Belfort** *Michel Lenczner*
Laboratoire Mécatronique3M
UTBM
90010 Belfort Cedex
Tél. : 03 84 58 35 34 - Fax : 03 84 58 31 46
Michel.Lenczner@utbm.fr
- Besançon** *Mihai Bostan*
UFR Sciences et Techniques
16 route de Gray 25030 Cedex Besançon
Tél : 03 81 66 63 38 - Fax : 03 81 66 66 23
mbostan@descartes.univ-fcomte.fr
- Bordeaux** *Cédric Galusinski*
Laboratoire de Mathématiques Appliquées
Université de Bordeaux I
351 cours de la Libération - 33405 TALENCE
Cedex
Tél. : 05 57 96 21 28 - Fax : 05 56 84 26 26
galusins@math.u-bordeaux.fr
- Brest** *Marc Quincampoix*
Département de Mathématiques
Faculté des Sciences
Université de Bretagne Occidentale
BP 809 - 29285 BREST Cedex
Tél. : 02 98 01 61 99 - Fax : 02 98 01 67 90
Marc.Quincampoix@univ-brest.fr
- Cachan ENS** *Sylvie Fabre*
CMLA-ENS Cachan
61 avenue du Président Wilson
94235 CACHAN Cedex
fabre@cmla.ens-cachan.fr
- Clermont - Ferrand** *Rachid Touzani*
Laboratoire de Mathématiques Appliquées
Université Blaise Pascal,
BP 45 - 63177 AUBIERE Cedex
Tél. : 04 73 40 77 06 - Fax : 04 73 40 70 60
Rachid.Touzani@math.univ-bpclermont.fr
- Compiègne** *Véronique Hédou-Rouillier*
Équipe de Mathématiques Appliquées
Département Génie Informatique
Université de Technologie
BP 20529 - 60205 COMPIEGNE Cedex
Tél : 03 44 23 49 02 - Fax : 03 44 23 44 77
Veronique.Hedou@dma.utc.fr
- Dijon** *Christian Michelot*
UFR Sciences et techniques
Université de Bourgogne
BP400 - 21004 DIJON Cedex
Tél. : 03 80 39 58 73 - Fax : 03 80 39 58 90
michelot@u-bourgogne.fr
- Evry la Génopole** *Bernard Prum*
Département de Mathématiques
Université d'Évry Val d'Essonne
Bd des Coquibus - 91025 ÉVRY Cedex
Tél. : 01 60 87 38 06 - Fax : 01 60 87 38 09
prum@genopole.cnrs.fr
- Grenoble** *Pierre Saramito*
Laboratoire de Modélisation et Calcul - IMAG
Université Joseph Fourier
BP 53 - 38041 GRENOBLE Cedex 9
Tél. : 04 76 51 46 10 - Fax : 04 76 63 12 63
Pierre.Saramito@imag.fr
- Grenoble 2** *Frédérique Letué*
Bât. des Sciences de l'homme de la société
BP 47 - 38040 GRENOBLE Cedex 9
Tél. : 04 76 82 59 58 - Fax : 04 76 82 56 40
Frederique.Letue@iut2.upmf-grenoble.fr
- Israël** *Ely Merzbach*
Dept. of Mathematics and Computer Science
Bar Ilan University, Ramat Gan. - Israel 52900
Tél. : (972-3)5318407/8 - Fax : (972-3)5353325
merzbach@macs.biu.ac.il
- La Réunion** *Philippe Charton*
Dépt. de Mathématiques et Informatique
IREMIA,
Université de La Réunion - BP 7151
97715 SAINT-DENIS MESSAG Cedex 9
Tél. : 02 62 93 82 81 - Fax : 02 62 93 82 60
Philippe.Charton@univ-reunion.fr
- Le Havre** *Adnan Yassine*
IUT du Havre
Place Robert Schuman
BP 4006 - 76610 LE HAVRE
Tél. : 02 32 74 46 42 - Fax : 02 32 74 46 71
adnan.yassine@iut.univ-lehavre.fr

Lille *Caterina Calgaro*
Laboratoire de Mathématiques Appliquées
Université des Sciences et Technologies de
Lille
Bat. M2, Cité Scientifique,
59655 VILLENEUVE D'ASCQ Cedex
Tél. : 03 20 43 47 13 - Fax : 03 20 43 68 69
Caterina.Calgaro@univ-lille1.fr

Limoges *Paul Armand*
LACO, ESA 6090 - Univ. de Limoges
123 avenue A. Thomas
87060 LIMOGES Cedex
Tél. : 05 55 45 73 30 - Fax : 05 55 45 73 22
paul.armand@unilim.fr

Lyon *Michèle Chambat*
Laboratoire d'Analyse Numérique
MAPLY - Bat. 10
Université Lyon I
43 bd du 11 Novembre 1918
69622 VILLEURBANNE Cedex
Tél. : 04 72 44 85 25 - Fax : 04 72 44 80 53
chambat@lan.univ-lyon1.fr

Marne La Vallée *Pierre Vandekerckhove*
Equipe d'Analyse et de Math. Appliquées
Univ. de Marne-la-Vallée Cité Descartes
5 bd Descartes - 77454 MARNE-LA-VALLEE
Cedex 2
Fax : 01 60 95 75 45 -
vandek@math.univ-mlv.fr

Maroc *Khalid Najib*
École nationale de l'industrie minérale
Bd Haj A. Cherkaoui, Agdal
BP 753, Rabat Agdal 01000 RABAT
Tél. : 00 212 37 77 13 60 - Fax : 00 212 37 77 10
55
najib@enim.ac.ma

Mauritanie *Zeine Ould Moharned*
Équipe de Recherche en Informatique
et Mathématiques Appliquées
Faculté des Sciences et Techniques
Université de Nouakchott
BP 5026 - NOUAKCHOTT MAURITANIE
Tel : 222 25 04 31 - Fax : 222 25 39 97
zeine@univ-nkc.mr

Metz *Zakaria Belhachmi*
Département de Mathématiques
Université de Metz
Île du Saulcy - 57 045 METZ Cedex 01.
Tél. : 03 87 54 72 87 - Fax : 03 87 31 52 73
belhach@poncelet.univ-metz.fr

Montpellier *Bruno Koobus*
Laboratoire ACSIOM
Université de Montpellier II, CC51
Place Eugène Bataillon
34095 MONTPELLIER Cedex 5
Tél : 04 67 14 32 58 - Fax : 04 67 14 35 58
koobus@math.univ-montp2.fr

Nantes *Catherine Bolley*
École Centrale de Nantes
BP 92101 - 44321 NANTES Cedex 3.
Tél : 02 40 37 25 17 - Fax : 02 40 74 74 06
Catherine.Bolley@ec-nantes.fr

Nancy *Didier Schmitt*
Institut Élie Cartan
Université de Nancy 1
BP 239 - 54506 VANDŒUVRE LÈS NANCY
cedex
Tél. : 03 83 91 26 67 - Fax : 03 83 28 09 89
Didier.Schmitt@iecn.u-nancy.fr

Nice *Stéphanie Lohrenge*
Lab. Jean-Alexandre Dieudonné
UMR Cnrs 6621
Université de Nice, Parc Valrose
06108 NICE Cedex 2
Tél. : 04 92 07 60 31 - Fax : 04 93 51 79 74
lohrenge@math.unice.fr

Orléans *Maitine Bergounioux*
Dépt. de Mathématiques - UFR Sciences
Université d'Orléans - BP. 6759
45067 ORLEANS Cedex 2
Tél. : 02 38 41 71 71 - Fax : 02 38 41 71 93
maitine@labomath.univ-orleans.fr

Paris I *Jean-Marc Bonnisseau*
UFR 27 - Math. et Informatique
Université Paris I - CERMSEM
90 rue de Tolbiac - 75634 PARIS Cedex 13
Tél. : 01 40 77 19 40 - Fax : 01 40 77 19 80
jeanmarc.bonnisseau@uni-paris1.fr

Paris V *Chantal Guihenneuc-Jouyaux*
Laboratoire de statistique médicale
45 rue des Saints Pères - 75006 PARIS
Tél. : 01 42 80 21 15 - Fax : 01 42 86 04 02
chantal.guihenneuc@univ-paris5.fr

Paris VI *Sidi Mahmoud Kaber*
Laboratoire Jacques-Louis Lions,
Boîte courrier 187
Univ. Pierre et Marie Curie
4 place Jussieu - 75252 PARIS Cedex 05
Tél. : 01 44 27 54 07 - Fax : 01 44 27 72 00
kaber@ann.jussieu.fr

Paris VI *Nathanael Enriquez*
Lab. de Probabilités et Modèles Aléatoires
Univ. Pierre et Marie Curie
4 place Jussieu - 75252 PARIS Cedex 05
Tél. : 01 44 27 54 76 - Fax : 01 44 27 72 23
enriquez@ccr.jussieu.fr

Paris IX *Céline Grandmont*
CEREMADE - Univ. de Paris Dauphine
Place du Mal de Lattre de Tassinay
75775 PARIS Cedex 16
Tél. : 01 44 05 48 71 - Fax : 01 44 05 45 99
grandmont@ceremade.dauphine.fr

Paris XI *Laurent Di Menza*
 Mathématiques Bat. 425
 Univ. de Paris-Sud - 91405 ORSAY Cedex
 Tél. : 01 69 15 60 32 - Fax : 01 69 15 67 18
 laurent.dimenza@math.u-psud.fr

Paris XII *Yuxin Ge*
 UFR de Sciences et Technologie
 Univ. Paris 12 - Val de Marne
 61 avenue du Général de Gaulle
 94010 CRETEIL Cedex
 Tél. : 01 45 17 16 52 -
 ge@univ-paris 12.fr

Pau *Brahim Amaziane*
 Laboratoire de Mathématiques Appliquées
 IPRA
 Université de Pau
 Avenue de l'Université
 64000 PAU
 Tél. : 05 59 92 31 68/30 47- Fax : 05 59 92 32 00
 brahim.amaziane@univ-pau.fr

Perpignan *Didier Aussel*
 Dépt de Mathématique - Univ. de Perpignan
 52 avenue de Villeneuve
 66860 PERPIGNAN Cedex
 Tél. : 04 68 66 21 48 - Fax : 04 68 06 22 31
 aussel@univ-perp.fr

Poitiers *Alain Miranville*
 Dépt de Mathématiques - Univ. de Poitiers
 Bd Marie et Pierre Curie - BP 30179
 86962 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL
 Cedex
 Tél. : 05 49 49 68 91 - Fax : 05 49 49 69 01
 Alain.Miranville@mathlabo.univ-poitiers.fr

Polytechnique *Carl Graham*
 CMAP, Ecole Polytechnique
 91128 PALAISEAU
 Tél. : 01 69 33 46 33 - Fax : 01 69 33 30 11
 carl@cmappx.polytechnique.fr

Rennes *Nicoletta Tchou*
 IRMAR - Campus de Beaulieu
 35042 RENNES Cedex
 Tél. : 02 99 28 26 19 - Fax : 02 99 28 67 90
 Nicoletta.Tchou@univ-rennes1.fr

Rouen *Adel Blouza*
 Laboratoire Raphael Salem
 Université de Rouen Site Colbert
 76821 MONT-SAINT-AIGNAN Cedex
 Tél. : 02 35 14 71 15 - Fax : 02 32 10 37 94
 Adel.Blouza@univ-rouen.fr

Saint-Étienne *Alain Largillier*
 Laboratoire Analyse Numérique
 Université de Saint Étienne
 23 rue du Dr Paul Michelon
 42023 ST ÉTIENNE Cedex 2
 Tél. : 04 77 42 15 40 - Fax : 04 77 25 60 71
 larg@anum.univ-st-etienne.fr

Savoie *Ioan Ionescu*
 Université de Savoie
 LAMA - UMR CNRS 5127
 73376 LE BOURGET DU LAC Cedex
 Tél. : 04 79 75 87 65 - Fax : 04 79 75 81 42
 ionescu@univ-savoie.fr

Strasbourg *Photis Nobelis*
 UFR de Mathématique et Informatique
 Université Louis Pasteur
 7 rue René Descartes
 67084 STRASBOURG Cedex
 Tél. : 03 88 41 63 08 - Fax : 03 88 61 90 69
 nobelis@math.u-strasbg.fr

Toulouse *Marcel Mongeau*
 Laboratoire MIP Univ. Paul Sabatier
 31062 TOULOUSE Cedex 04
 Tél. : 05 61 55 84 82 - Fax : 05 61 55 83 85
 mongeau@cict.fr

Tours *Christine Georgelin*
 Laboratoire de Mathématiques et
 Physique Théorique
 Faculté des Sciences et Techniques de Tours
 7 Parc Grandmont - 37200 TOURS
 Tél. : 02 47 36 72 61 - Fax : 02 47 36 70 68
 georgelin@univ-tours.fr

Tunisie *Henda El Fekih*
 ENIT-LAMSIN
 BP37 1002 - TUNIS-BELVÉDERE
 Tél. : 2161-874700 - Fax : 2161-872729
 henda.elfekih@enit.rnu.tn

Uruguay *Hector Cancela*
 Universidad de la República
 J. Herrera y Reissign 565
 MONTEVIDEO, URUGUAY
 Tél. : + 598 2 7114244 ext. 112 - Fax : + 598 2
 7110469
 cancela@fing.edu.uy

Zurich *Michel Chipot*
 Angewandte Mathematik
 Universität Zürich
 Winterthurerstr. 190 - CH 8057 ZÜRICH
 Tél. : (41) 1 635 58 50 - Fax : (41) 1 635 57 05
 chipot@amath.unizh.ch



Bulletin d'adhésion 2004 - Personnes morales

L'adhésion est valable pour l'année civile 2004

Institution :
Nom :
Sigle :
Service ou département :
Site web :
Représentée par : M., Mme, Melle,
Prénom, NOM :
Titre ou fonction :
Adresse :

Téléphone : Télécopie :

Adresse électronique :

Votre adresse peut-elle être communiquée à des annonceurs ? oui non

Serveur de liste électronique. Souhaitez-vous que votre adresse électronique soit ajoutée à la liste d'envoi de la SMAI ? oui non

Tarif des cotisations : (ne cochez qu'une seule case)

- Cotisation SMAI laboratoire industriel (LI) 510 €
Ce tarif permet d'obtenir gratuitement un jeu d'étiquettes des adhérents de la SMAI
- Cotisation SMAI laboratoire universitaire (LU) 155 €

Montant de la cotisation €

Suppléments éventuels : (cochez la/les case(s) de votre choix)

- Soutien à la participation de la SMAI à l'EMS 40 €
Ce soutien comprend une cotisation EMS et permet de recevoir EMS Newsletter
- Soutien à la participation du GAMNI/SMAI à ECCOMAS 40 €
Ce soutien permet de recevoir ECCOMAS Newsletter

Montant des suppléments €

Total de la cotisation et des suppléments €

Modalités de règlement :

- Par chèque bancaire ou postal, ci-joint, à l'ordre de la SMAI
- Par bon de commande ci-joint

Factures : nombre d'exemplaires désiré :

Adresse de facturation :

Fait à le 2004

Signature



Bulletin d'adhésion 2004 - Personnes physiques

L'adhésion est valable pour l'année civile 2004

M., Mme, Melle, Prénom, NOM :

Titre ou fonction :

Établissement de fonction ou de rattachement :

Adresse professionnelle :

Société ou université :

Service ou département :

Adresse :

Téléphone professionnel :

Télécopie :

Adresse électronique :

Adresse personnelle :

Téléphone personnel :

Page web personnelle :

Adresse de correspondance : (indiquez l'adresse à laquelle vous désirez recevoir votre courrier)

adresse professionnelle adresse personnelle

Votre adresse personnelle peut-elle figurer dans l'annuaire de la SMAI ? oui non

Votre adresse de correspondance peut-elle être communiquée à des annonceurs ? oui non

Serveur de liste électronique :

Souhaitez-vous que votre adresse électronique apparaisse dans la liste d'envoi de la SMAI ? oui non

Groupes permanents de la SMAI :

Si vous désirez appartenir à un ou plusieurs de ces groupes, cochez la/les case(s) correspondante(s)

- GAMNI Groupe pour l'Avancement des Méthodes Numériques de l'Ingénieur
- MAS Modélisation Aléatoire et Statistique
- MODE Mathématiques de l'Optimisation et de la Décision
- AFA Association Française d'Approximation

Merci de renvoyer ce bulletin accompagné de votre règlement à :
SMAI, Institut Henri Poincaré, 11 rue Pierre et Marie Curie, 75231 PARIS Cedex 05

Voir au dos pour les tarifs

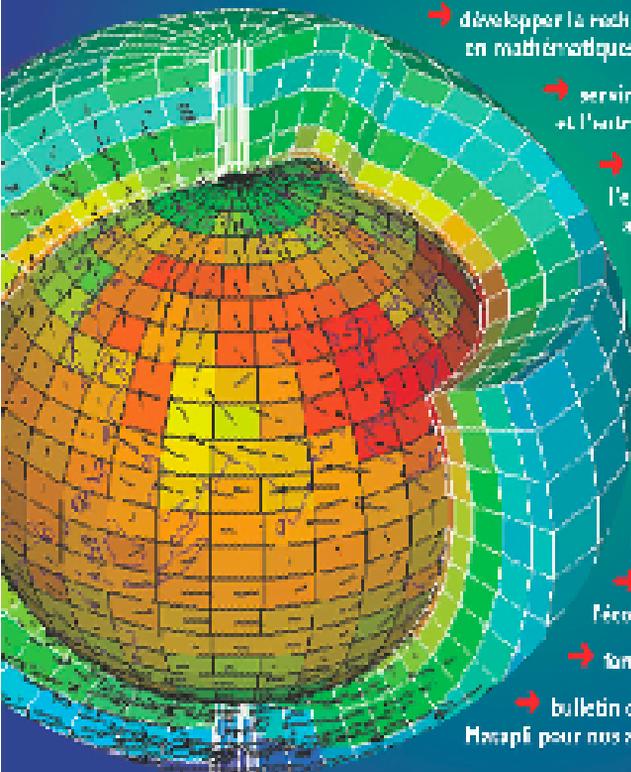
SMAI

NOS OBJECTIFS :

- développer la recherche en mathématiques appliquées
- servir d'interface entre l'université et l'industrie
- contribuer à la réflexion sur l'enseignement des mathématiques appliquées à tous les niveaux

NOS ACTIVITÉS :

- édition scientifique : collection de livres Mathématiques et applications, revues *Esaim : COCV, P & S, Proc et M3AN*
- organisation de congrès, rencontres et journées industrielles
- en liaison avec le monde industriel, l'école d'été du CEMRACS
- formation continue
- bulletin de liaison *Macap* pour nos adhérents



SMAI - Institut Henri Poincaré

11, rue Pierre et Marie Curie - 75 131 Paris Cedex 05 - Tél : 01 44 27 66 61 - Fax : 01 44 07 01 64

<http://smai.emath.fr>