



**HAL**  
open science

## Les mathématiques et l'industrie

Benoît Desjardins, Xavier Leleu

► **To cite this version:**

Benoît Desjardins, Xavier Leleu. Les mathématiques et l'industrie. Sciences de l'Homme et Société. 1996. hal-01908539

**HAL Id: hal-01908539**

**<https://minesparis-psl.hal.science/hal-01908539>**

Submitted on 30 Oct 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



[318]

Benoît DESJARDINS

Xavier LELEU

Ingénieurs élèves de 3ème année

Corps des Mines

# LES MATHÉMATIQUES ET L'INDUSTRIE

Mémoire de troisième année

**CONSULTATION SUR PLACE**

Direction de  
Michel SCHMITT

Remerciements.....	4
Résumé.....	5
Introduction.....	6
Perspective historique.....	7
1. État des lieux des mathématiques dans l'industrie.....	8
1.1. Typologie pas secteur d'activité.....	8
1.1.1. L'Aérospatiale.....	9
1.1.2. L'automobile.....	10
1.2. Typologie par domaine de mathématiques.....	10
1.2.1. Les mathématiques en recherche et développement.....	10
1.2.1.1. Les mathématiques de la prédiction.....	10
1.2.1.2. Les mathématiques et la conception d'algorithmes.....	11
1.2.2. Les mathématiques de l'explication et de la décision.....	12
1.3. Les théories mathématiques répondent-elles aux problèmes de l'industrie?.....	13
2. Les mathématiques vécues sur le terrain.....	16
2.1. Le marketing des mathématiques.....	16
2.1.1. Les mathématiques Qui Font Peur.....	16
2.1.1.1. Quelques exemples.....	16
2.1.1.2. Les Dangers de l'Informatique.....	19
2.1.2. Les mathématiques cachées.....	21
2.1.2.1. Les mathématiques cachées dans les produits.....	21
2.1.2.2. Les mathématiques cachées dans les chiffres et dans les images.....	23
2.1.3 Les mathématiques qui rassurent.....	24
2.1.3.1. Exemple de la Société Générale.....	24
2.1.3.2. Les gains de productivité liés aux maths.....	25
l'ONERA.....	25
PSA.....	26
2.1.3.3. L'esprit de Géométrie.....	26
2.2. Les différents modes de coopération des mathématiques et de l'industrie.....	27
2.2.1. Les mathématiques existantes appliquées au problèmes concrets.....	27
2.2.2. Les modes de coopération interdisciplinaires.....	28
3. La gestion de la recherche.....	30
3.1. Les mathématiques en recherche - développement.....	30
3.2. Les Docteurs et l'Industrie.....	31
3.2.1. Les conventions CIFRE.....	31
3.2.2. Le devenir des docteurs.....	32
3.3. Les Contrats.....	33
3.3.1. Le modèle CNRS.....	33
3.3.1.1. Les Missions du CNRS (décret du 24 novembre 1982).....	33
3.3.1.2. Les ressources humaines.....	33
Effectifs.....	33
Environnement matériel professionnel.....	34
3.3.1.3. Les Contrats.....	35
3.3.1.4. Concurrence avec les autres laboratoires.....	36
3.3.1.5. Politique d'évaluation et d'orientation de la recherche.....	36
3.3.2. Le modèle Fraunhofer.....	37

3.3.3. Le modèle INRIA.....	38
Les Missions.....	38
Sélection et évaluation des projets de recherche.....	40
Les contrats.....	41
3.4.4. Le Laboratoire Central de Recherches de Thomson (LCR).....	42
3.5. Quelles politiques d'orientation de la Recherche.....	42
3.5.1. La position du ministère de la recherche.....	42
3.5.2. La veille technologique.....	44
4. Conclusion.....	44

## Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement les quelques 45 personnes qui ont accepté de nous rencontrer dans le cadre de notre étude, pour le temps qu'ils nous ont aimablement consacré et l'information précieuse qu'ils nous ont fournie, et particulièrement Monsieur Serge Catoire, qui nous a ouvert les portes de l'Aérospatiale. Leur expérience et leur intérêt pour ce mémoire nous ont été très profitables.

Nous souhaitons également remercier particulièrement notre pilote Michel Schmitt, directeur du centre de Géostatistiques de l'Ecole des Mines de Paris. Grâce à ses nombreuses remarques, sa connaissance à la fois du tissu industriel et du monde de la recherche en mathématiques, sa disponibilité pour nous écouter, il nous a permis d'orienter nos investigations dans des directions fructueuses.

Nous voudrions enfin exprimer notre reconnaissance à la Commission qui a suivi l'avancée de notre mémoire et toujours écouté nos présentations sans complaisance, mais avec la plus grande attention. Par leurs critiques et les contacts qu'ils nous ont indiqués, ils nous ont aidé à améliorer notre étude tant au niveau du fond que de la forme.

# Les mathématiques et l'industrie

## Résumé

L'application des mathématiques dans l'industrie prend des formes très diverses. Les mathématiques utilisées en recherche et développement se rencontrent principalement dans les secteurs de l'aéronautique, l'armement, l'informatique, l'électronique et l'automobile. Elles sont alors souvent associées à une modélisation physique, pour la prédiction, ou employées en informatique, pour la conception d'algorithmes. D'autre part, les mathématiques ont aussi un rôle d'aide à la décision et de compréhension de situations complexes, notamment dans le secteur financier. La plupart des problèmes difficiles qui émergent de l'industrie, mal adaptés à un cadre théorique, sont traités par des méthodes approchées, retravaillées pour les besoins. Ainsi, les outils informatiques ont rendu possibles les investigations numériques et la mise en oeuvre d'algorithmes probabilistes.

Le danger de ces mathématiques serait de présenter la forme ésotérique de la science sans en avoir la rigueur, d'introduire des erreurs, et donc de rebuter les industriels. Les mathématiques ne parviennent à gagner la confiance des industriels que lorsque leurs avancées se traduisent en gains évidents pour l'entreprise. Les mathématiques, dans une large étendue, sont manifestement indispensables à la mise en orbite d'un satellite mais elles interviennent aussi sous forme plus cachée dans de nombreuses étapes d'étude et de fabrication de produits de consommation courante. L'apport des mathématiques provient rarement directement de résultats théoriques fins, mais plus souvent de méthodes issues de l'expérience pratique ou de travaux interdisciplinaires.

Une entreprise peut profiter de son expérience pratique pour développer en interne les mathématiques qui répondent à ses besoins, mais les travaux interdisciplinaires font appel, par contrats, à des compétences externes qui proviennent d'un jeune doctorant ou d'un laboratoire académique. L'examen des contrats correspondants nous a permis d'identifier trois modèles de gestion de la recherche en mathématiques : le modèle CNRS, le modèle Fraunhofer, et le modèle INRIA. Leur mode de financement et d'évaluation induisent une orientation spécifique des thèmes de recherche. Une étude détaillée montre que le rôle de chacun des trois modèles dans l'industrie conditionne celui des deux autres.

## Introduction

Au XVIIIème siècle, le mathématicien écossais Mac Laurin, au sommet de son art, abandonne ses recherches pour se consacrer au calcul du volume des barils de mélasse, s'intéressant aux moindres aspects techniques, allant jusqu'à mesurer lui-même les dimensions. Pourtant, de nos jours, Mac Laurin est bien plus connu pour sa formule de développement limité. Au début du XXème siècle, le mathématicien anglais Hardy déclare qu'il étudie la théorie des nombres car il est sûr que cette discipline n'aura jamais aucun usage militaire. Aujourd'hui, la théorie des nombres est abondamment utilisée en cryptographie, dont les militaires sont les premiers consommateurs. Ainsi, l'histoire nous donne deux exemples opposés l'un d'un chercheur mettant ses connaissances au service d'une cause sans que cela n'ait laissé de trace impérissable en métrologie, et l'autre d'un scientifique ayant travaillé malgré lui sur des applications militaires avec 50 ans de décalage. Loin de ces deux cas extrêmes, la coopération entre mathématiques et industrie prend aujourd'hui des formes diverses fortement marquées par l'histoire du XXème siècle.

Les industriels sont traditionnellement peu tentés de faire appel aux mathématiques qui n'apportent pas une méthode systématique de résolution de problème. Mais l'émergence récente de l'informatique, avec la croissance exponentielle de la puissance des ordinateurs, donne vie à de plus en plus d'objets mathématiques qui peuvent servir à appréhender des problèmes concrets. Cette démarche, connue surtout dans le domaine du calcul numérique, peut s'adapter à des champs beaucoup plus vastes. Ce ne sont probablement pas les théorèmes profonds qui peuvent avoir une application pratique, mais plutôt la créativité qui en est à l'origine et la philosophie qui en ressort. Les entreprises sont confrontées à des problèmes qui naissent directement de leur activité, c'est-à-dire a priori posés en dehors de tout cadre conceptuel; l'expérience des mathématiques peut être un bon guide pour les aborder.

Nous avons enquêté auprès d'entreprises et d'organismes de recherche, entre les mois d'octobre 1995 et de juin 1996, pour étudier la forme que prenait aujourd'hui la coopération entre les mathématiques et l'industrie. Cela nous a permis d'en dresser un état des lieux, d'en observer le vécu, au quotidien, et d'examiner les différents moyens de gérer le lien science/applications.

## Perspective historique

Au début du siècle, les mathématiques sont très développées en Europe et voient émerger deux personnages très différents. Le premier, le français Poincaré, choisit de s'intéresser aux problèmes issus de la nature, c'est-à-dire, ceux "qui se posent, et non qu'on se pose", pour créer des outils élaborés en vue de leur étude, en adoptant une démarche intuitive et une approche géométrique. Entre autres, ses méthodes qualitatives permettront d'étudier des systèmes dynamiques dont on ne sait calculer de solution analytique. Comme d'autres mathématiciens français reconnus et productifs, il travaille seul et ne fonde pas d'école. Le second, l'Allemand Hilbert inaugure les mathématiques modernes en considérant des objets régis par des axiomes, oubliant leur rapport avec la réalité mais ne retenant que les relations qu'ils entretiennent entre eux. Avec Félix Klein, il est à l'origine de l'école de Göttingen qui sera la capitale mondiale des mathématiques entre 1900 et 1930. A l'origine, Göttingen promeut l'intégration des mathématiques dans l'industrie ainsi que leur rôle dans autres les sciences. Puis, sous l'influence d'Hilbert, la primauté est donnée aux problèmes provenant de rapprochements entre sous-domaines internes aux mathématiques. L'investigation se fait par l'étude de problèmes librement créés sans faire appel à d'autres disciplines plus concrètes. La trilogie algèbre, géométrie algébrique, théorie des nombres, est privilégiée alors que les probabilités et statistiques sont particulièrement délaissées. Ces mathématiques pures et autonomes trouveront pourtant des applications importantes en physique; ainsi en est-il des espaces de Hilbert qui sont à la base du formalisme de la mécanique quantique. La montée du nazisme et de l'anti-sémitisme en Europe dans les années 30 entraîne la chute du centre de Göttingen et l'émigration de nombreux scientifiques européens outre-Atlantique.

Aux Etats-Unis, dans l'immédiate avant-guerre, l'école de mathématiques majoritaire, menée par G. Birkhoff et O. Veblen, s'intéresse peu au monde industriel et considère que si leur science peut servir d'outil à d'autres disciplines, elle n'en partage pas les objectifs. L'arrivée des immigrés européens prestigieux, qui effraye Birkhoff et enthousiasme Veblen, ainsi que l'imminence du danger initient des programmes de mathématiques appliquées pour aider l'industrie civile et militaire. Puis les Etats-Unis s'engagent dans le conflit et les scientifiques exilés participent sans réserve à l'effort de guerre, oubliant leurs préoccupations de rigueur pour de nouvelles exigences d'efficacité dictées par l'urgence. Une agence créée pour la cause, appelée *Applied Mathematics Panel*, mène 194 études au moyen de contrats passés avec 11 universités, et obtient des résultats d'une ampleur considérable. Hermann Weil, John Von Neumann, Richard Courant sont les principaux artisans des travaux de New-York University en mécanique des fluides et ondes de choc qui serviront à la conception des moteurs d'avion et des bombes. La mécanique des milieux continus, à l'Université de Brown, est appliquée à la défense anti-aérienne, la balistique sous-marine est étudiée à Harvard et l'aérobballistique à Columbia. Les probabilités et statistiques, également très sollicitées, vont conférer à Berkeley une grande renommée dans ce domaine qui concerne beaucoup les activités de guerre aérienne, comme l'estimation des dommages occasionnés sur un avion par des tirs aériens. Au MIT, Norbert Wiener étudie la détectabilité d'un signal dans un bruit, mais aussi comment donner une prévision statistique de la course d'un avion à partir de l'information disponible. Enfin, la recherche opérationnelle, qui touche d'abord les stratégies de convois, les déploiement de forces, les affectations de radar, s'étend ensuite à tous les aspects du fonctionnement d'organisations complexes et à la gestion optimale de ressources. Ainsi John Von Neumann introduit la théorie des jeux pour déterminer la distribution géographique à donner aux forces de frappe pour

maximiser les dommages produits sur des cibles spécifiées. Au lendemain de la guerre, les Etats-Unis rassemblent les meilleurs mathématiciens, qui sont plus ouverts que jamais aux autres disciplines.

Les mathématiques appliquées connaissent alors un grand succès dans les congrès internationaux puis, dans les années 50 et 60, elles cèdent de nouveau la place aux mathématiques structurales hilbertiennes. C'est surtout le cas en France, où l'école de Bourbaki instaure une idéologie prônant le formalisme et la suprématie des domaines les plus abstraits. Ce dogmatisme tend à isoler les mathématiques françaises des autres sciences. A partir des années 70, l'avènement de l'informatique et les besoins de la technologie ont amorcé un retour au concret. Désormais, un grand nombre de développements sont motivés par des problèmes nés dans un contexte industriel.

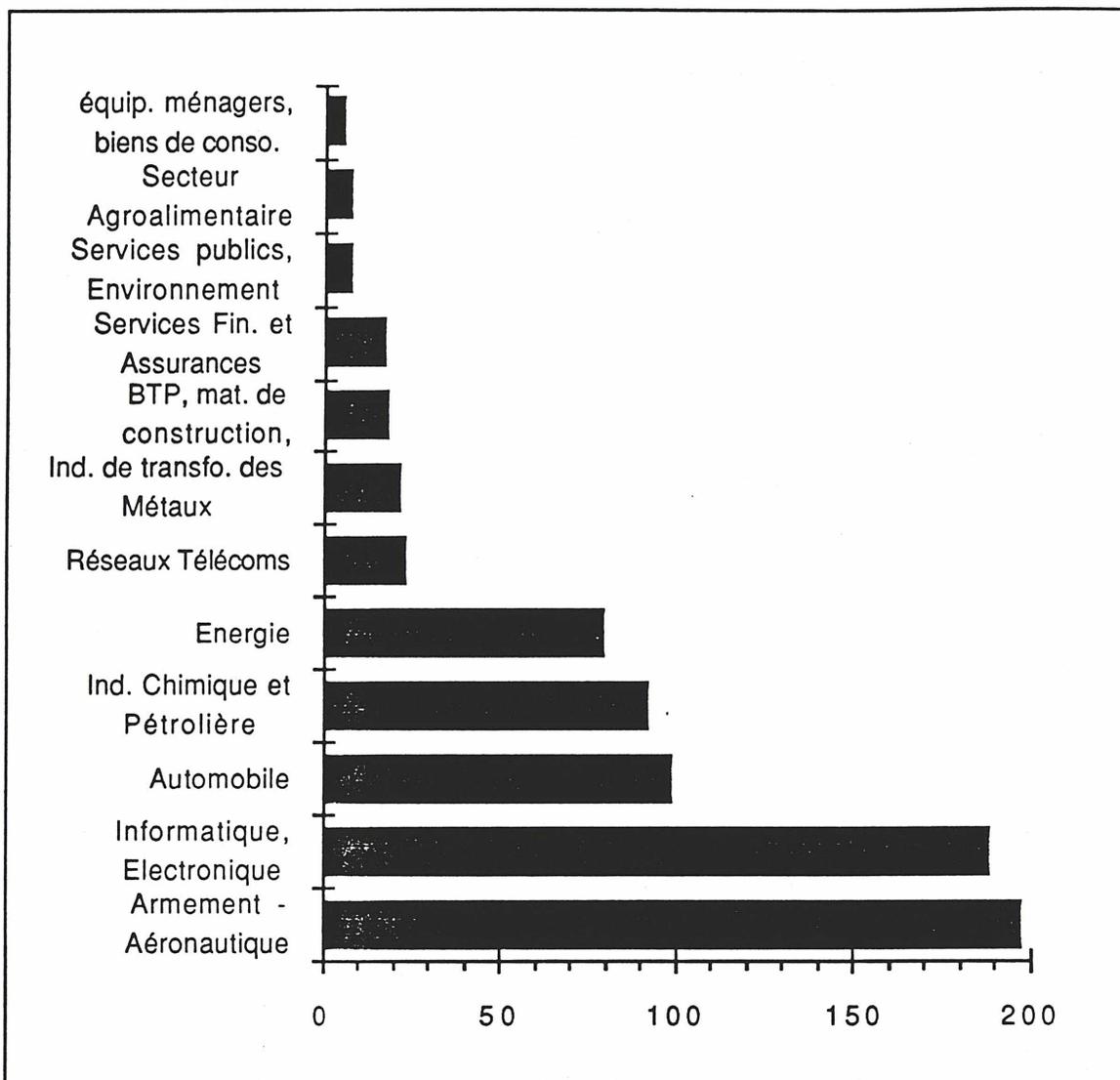
## 1. État des lieux des mathématiques dans l'industrie

Le tableau qui suit résulte des faits que nous avons observés lors de nos recherches, au cours desquelles nous avons surtout mis l'accent sur les besoins actuels en mathématiques. Bien que ceux-ci soient rarement clairement exprimés et souvent diffus, leur analyse permet de dégager de grands traits caractéristiques.

### 1.1. Typologie par secteur d'activité

Pour déterminer quel secteur d'activité est le plus concerné par l'étude, nous avons recherché les industries qui investissent dans la recherche en mathématiques aujourd'hui. Une entreprise a trois façons de consacrer des dépenses aux mathématiques. Dans la première, un mathématicien employé par la firme réalise les recherches en interne. Ce cas est très rare; nous avons trouvé très peu de chercheurs dans l'industrie affirmant qu'ils faisaient des mathématiques. L'un de ceux que nous avons rencontré se définit même comme "un mathématicien perdu dans l'industrie". La deuxième consiste à contracter avec un laboratoire extérieur, universitaire par exemple. Les contrats qui en résultent sont frappés de la confidentialité qu'implique l'innovation industrielle. Enfin, la troisième est le cofinancement par l'entreprise d'une thèse, éventuellement suivi de l'embauche du jeune docteur.

Ce dernier type de coopération fournit une bonne source de statistiques pour évaluer le transfert de la recherche vers l'industrie. En effet, chaque thèse constitue un travail suivi sur deux ou trois ans sur un thème bien ciblé intéressant à la fois un laboratoire académique et une entreprise. Les contrats CIFRE (convention industrielle de formation pour la recherche) sont un mode de cofinancement de thèse particulièrement intéressant pour notre étude. La figure ci-dessous représente la répartition des 502 contrats CIFRE portant sur les mathématiques au cours des 7 dernières années. On y distingue un bloc de 3 secteurs prédominants formé par l'aéronautique, l'armement, l'informatique, l'électronique et l'automobile, qui partagent un grand nombre de caractéristiques communes.



Répartition des contrats CIFRE par secteur d'activité

### 1.1.1. L'Aérospatiale

Ainsi, les activités du groupe Aérospatiale sont divisées en 4 branches (Avions, Missiles, Espace et Défense, Hélicoptères) organisées en centres opérationnels, chacun responsable d'une partie de la recherche et du développement. A cette structure s'ajoute le centre commun de recherche de Suresnes dont la mission est de capter les avancées de la science pour les introduire dans les usines. Cette distribution ne correspond pas à la répartition des thèmes abordés. Il y a donc redondance ou manque de certaines études. Afin d'améliorer cette situation, Serge Catoire a entrepris de fédérer en réseau l'ensemble de la recherche du groupe et de lancer des concertations techniques sur 90 sujets. En plus des développements internes, l'Aérospatiale passe des contrats avec des organismes dont l'ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales). Les thèmes impliquant les mathématiques sont nombreux. En science des matériaux, des techniques sophistiquées d'analyse servent à appréhender le phénomène de l'ablation: certains engins spatiaux sont revêtus d'une couche carbonée qui s'évapore lors de la rentrée en atmosphère, ce qui refroidit la paroi extérieure mais aussi déplace le centre de poussée. Une fusée est souple, remplie de fluides mobiles et pilotée par l'arrière, autant de difficultés qui nécessitent des recherches approfondies en mécanique des structures. La prolifération de

câbles, sources de parasites, reliant les divers dispositifs électroniques d'un avion donne lieu à des calculs de compatibilité électromagnétique, qui passe par la résolution des équations de Maxwell. L'étude de la furtivité comporte également des développements en électromagnétique. La navigation met en jeu deux sortes de mathématiques: pour le guidage (contrôle de la trajectoire du centre de gravité), la solution donnée par le principe du minimum de Pontryagin et pour le pilotage (contrôle du mouvement autour du centre de gravité), le filtrage de Kalman. Les systèmes informatiques et de communication, et la sûreté de fonctionnement qu'ils impliquent sont aussi fortement consommateurs de mathématiques. Les calculs en hydrodynamique, aérodynamique, thermique, énergétique, propulsion, interviennent abondamment et balayent une grande partie du spectre des investigations jamais envisagées par les scientifiques, de la basse altitude à l'atmosphère raréfiée et des vitesses lentes aux plus rapides.

### **1.1.2. L'automobile**

Dans l'automobile, les mathématiques interviennent tout au long de la conception du produit. Le développement d'une automobile, qui coûte entre 5 et 10 milliards de Francs, peut être remis en cause par les essais de choc et de vibrations. Il est donc crucial de pouvoir prévoir le résultat de ces essais par calcul avant les tests finaux. Beaucoup d'autres problèmes requièrent l'usage des mathématiques. Ainsi les voitures sont de plus en plus équipées de systèmes pilotés qui font appel à l'automatique: l'injection qui a remplacé le carburateur, le freinage ABS, les boîtes automatiques et les suspensions hydrauliques. La théorie du comportement routier consiste à modéliser le véhicule en 5 corps rigides (l'habitacle et les 4 roues) reliés par des liaisons spécifiées et est utilisée pour simuler la voiture en temps réel afin de tester son électronique embarquée. La mécatronique, qui combine mécanique, hydraulique et électronique fournit des équations que le couplage entre chaque partie rend complexe. Enfin, les problèmes d'optimisation de forme des pièces massives pour en réduire le coût matière, les recherches en acoustique visant à supprimer le bruit du moteur dans l'habitacle, les questions d'aérothermique liées au refroidissement du pot d'échappement, les études de combustion, les modèles de pneu, les engrenages et roulements à billes sont très demandeurs en mathématiques.

## **1.2. Typologie par domaine de mathématiques**

Dans les thèmes tirés de l'industrie aérospatiale et automobile cités plus hauts, les mathématiques sont mises en oeuvre pour la recherche et le développement. Elles remplissent alors essentiellement deux fonctions: la prédiction d'un comportement physique ou la conception d'algorithmes informatiques.

### **1.2.1. Les mathématiques en recherche et développement**

#### **1.2.1.1. Les mathématiques de la prédiction**

Lors de la conception d'un produit, vérifier que son comportement répond aux spécifications exige souvent une expérimentation. En aéronautique par exemple, le travail de conception et les tests de vérification sont deux opérations imbriquées. Le dessinateur modifie la forme d'une aile au fil des essais et obtient le profil recherché par itérations successives. De nombreux aspects de l'expérimentation réelle peuvent être atteints par la simulation numérique. Celle-ci s'appuie sur la science physique, qui décrit l'état d'un système par des grandeurs dont l'évolution est régie par des équations.

Moyennant une simplification des formules et une discrétisation des variables, le calcul prédictif du système est converti en un algorithme que l'on programme sur ordinateur.

L'ONERA a été pionnière dans les années 50 pour la simulation informatique des écoulements aérodynamiques afin de réduire les essais sur maquettes en soufflerie qui se révélaient beaucoup plus coûteux et longs à mettre en oeuvre. Aujourd'hui, la fierté de l'ONERA est d'avoir continué à développer des moyens d'essais indispensables pour valider les résultats en dernier recours. A l'inverse, d'autres centres ayant axé toute leur stratégie sur l'utilisation de l'ordinateur sont devenus tributaires des laboratoires expérimentaux. La simulation, qui repose sur des hypothèses, parfois même sur des intuitions ou des croyances, ne se substitue pas à l'expérience qui se fonde sur l'observation des faits.

Plus que la diminution des coûts et le gain de temps, l'approche numérique apporte une quantité considérable d'information supplémentaire. Sur un essai, mesurer une grandeur signifie disposer d'un capteur approprié. L'informatique libère le concepteur, qui peut multiplier les simulations et connaître les valeurs prises par toutes les variables. Cependant, la surabondance d'information pourrait elle-même devenir nuisible lorsque le résultat d'un calcul remplit l'équivalent de plusieurs annuaires. C'est pourquoi on a recours à des modes de visualisation de résultats sous forme d'images de synthèse, qui au départ représentaient des objets de forme réelle dont la couleur indiquait une valeur par un code. Peu à peu, l'image suggère des effets, comme la profondeur rendue par l'ombre et la brume, montre des phénomènes qui autrement seraient hors de portée de notre regard, tels les champs magnétiques, devient interactive en autorisant la manipulation indirecte de l'objet. Ainsi, la modélisation et l'analyse numérique, au moyen de l'informatique, ont donné naissance à l'expérimentation virtuelle.

Les mathématiques de la prédiction ne se limitent pas à l'analyse numérique, les probabilités et statistiques servent au calcul de la fiabilité d'un missile, d'une fusée ou d'une centrale nucléaire. Elles interviennent aussi pour les filtres numériques, comme le filtre de Kalman qui permet de restituer des données à partir de mesures bruitées. Le filtrage de Kalman associé à l'automatique intervient dans les systèmes pilotés. Enfin, l'optimisation, le contrôle non-linéaire sont utilisés pour le pilotage des missiles, le rendez-vous spatial, la simulation de bataille. Les mathématiques servent alors à déterminer quelle meilleure commande appliquer pour répondre à un objectif donné. Elles ont permis de faire effectuer à un avion la manoeuvre consistant en un demi-tour brutal, qu'aucun pilote n'aurait pu réaliser sans l'aide de l'électronique. L'apport de ces mathématiques tient essentiellement à la rapidité de calcul de l'outil informatique.

#### 1.2.1.2. Les mathématiques et la conception d'algorithmes

Il n'y a pas de frontière nette entre informatique théorique et mathématiques. Ainsi le choix d'une architecture informatique, séquentielle ou parallèle, pour attaquer un problème se répercute sur la méthode de résolution mathématique. Pour reprendre l'analogie habituelle de la construction d'une maison, si l'algorithme *séquentiel* correspond à un ouvrier unique qui prend une brique, la transporte et la pose; programmer en *parallèle* revient à gérer une équipe d'ouvriers. Il y deux approches classiques du parallélisme; l'une où l'on découperait la maison en "sous-domaines" pour affecter à chaque ouvrier un pan de mur, deux pans ne seraient raccordés que lorsque ceux-ci seraient terminés; l'autre où chaque ouvrier pose sa brique au premier endroit libre. Le calcul parallèle est beaucoup employé dans la résolution d'équations physiques. La première méthode consiste alors à décomposer un domaine physique en blocs réguliers, or toute modélisation ne s'y prête pas. Dans ce cas, la prise en

compte du parallélisme se fait très en amont dans la résolution et risque de prendre le pas sur le raisonnement physique. Le deuxième mode de parallélisme est plus adapté aux méthodes de type particulière comme celle de Monte Carlo. Cela pose des problèmes théoriques très ardues d'embouteillage et d'élection qu'engendre le partage de ressources communes. Pour les praticiens, le calcul parallèle est une démarche de pensée différente, qui, selon les mots de l'un d'entre eux, "n'est ni une science, ni un art, mais de la divination". Certains responsables de recherche citent le parallélisme comme la percée majeure qui augmentera la puissance de calcul.

D'autres marquent un fort attachement au calcul formel, qui est le traitement informatique d'expressions symboliques. Des théories fines d'algèbre sont à la base des systèmes de calcul formel, particulièrement utilisés pour traiter les développements à grand nombre de termes. C'est le cas en mécanique céleste pour la mise en équation de la trajectoire d'un satellite par la théorie des perturbations. Le calcul formel va de l'automatisation de tâches simples à des applications extrêmement complexes, tel un projet de l'INRIA de dérivation formelle d'une fonction écrite en langage Fortran. Il met aux mains de l'ingénieur un outil très puissant, pourtant encore peu présent dans l'industrie. A l'Aérospatiale, il a été lancé sans succès en raison de problèmes sociologiques; son intégration nécessitait une formation approfondie et un long temps d'adaptation.

La géométrie algébrique, domaine abstrait des mathématiques par excellence, a inspiré à Bézier, alors ingénieur chez Renault, les B-Splines, modèles de surfaces adaptées à la manipulation sur ordinateur, pour dessiner la ligne d'une voiture. L'esthétique de l'automobile rejoint celle des mathématiques! Dans certains cas singuliers, des mathématiques éthérées fournissent les outils qui répondent à des attentes terrestres. Evariste Galois eût été bien surpris s'il avait appris que sa théorie des corps finis serait à la base de codes correcteurs d'erreurs, méthode de codage consistant à rajouter des données redondantes afin de préserver au mieux l'information en cas d'erreur de transmission. De la même façon, la théorie des nombres est utilisée dans des algorithmes de cryptographie. La difficulté qu'il y a à décoder un message ainsi crypté est liée directement à celle qu'il y a à décomposer un grand nombre en facteurs premiers. Bien qu'ils n'aient pas été élaborés pour ce motif, des objets mathématiques ont des propriétés qui coïncident avec des besoins de l'industrie.

### 1.2.2. Les mathématiques de l'explication et de la décision

Un autre type de mathématiques, moins courant en recherche et développement, est plus utilisé pour la production ou le management, surtout dans les secteurs de l'énergie, de l'industrie pétrolière et des banques.

En production, les outils de Shainin, à base de statistiques, sont utilisés dans les usines de la SAGEM. Ainsi, pour retrouver quelle cause, parmi les nombreux paramètres que possède un système complexe, est responsable d'une panne, il est habituel de procéder à des essais en faisant varier les paramètres. Cependant, balayer toutes les combinaisons possibles prendrait trop de temps. Les plans d'expérience sont une méthodologie permettant d'optimiser les essais en vue de dépister le paramètre coupable.

Les statistiques servent aussi à aider à la prise de décision. La géostatistique a pour but d'évaluer les gisements miniers et pétroliers à partir de la structure géologique et l'information partielle obtenue par sondage. La géostatistique a des applications à la pêche, l'épidémiologie, l'environnement, la météorologie et à la finance. Les mathématiques financières jouent un rôle important à la Société Générale où elles servent au calcul de risque ou à la fixation du prix des options.

L'institut des sciences de la complexité, émanation du CREA (Centre de Recherche en Epistémologie Appliquée) a des contrats avec France Telecom et EDF afin de comprendre l'environnement de l'entreprise devenu complexe à la suite des dérèglementations.

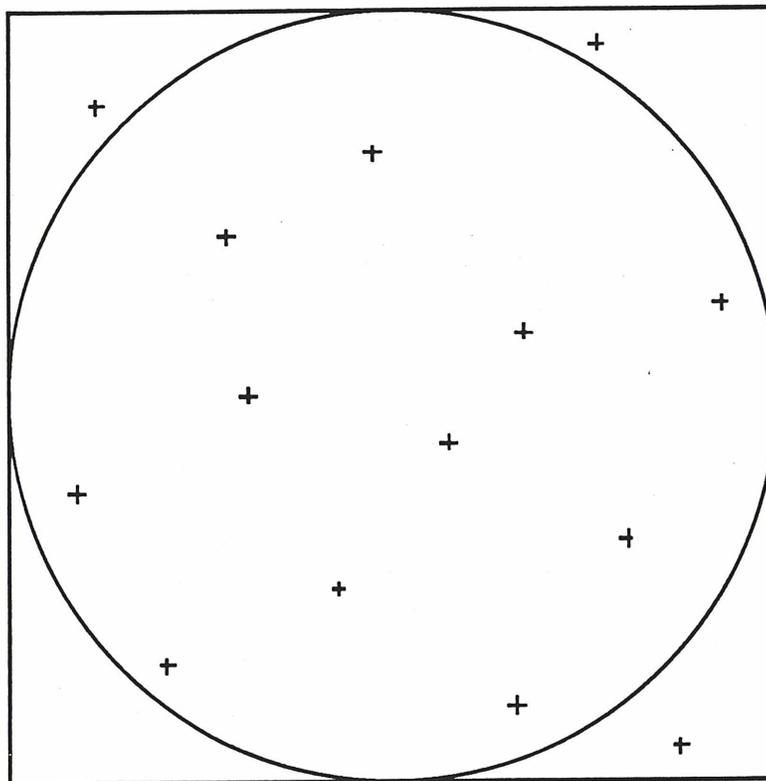
### 1.3. Les théories mathématiques répondent-elles aux problèmes de l'industrie?

Pour l'industrie, les mathématiques ne sont jamais une fin en soi. Pourtant, l'expérimentation virtuelle, décrite plus haut, revient à étudier le comportement des équations modélisant un système physique plutôt que le système lui-même. L'expérimentateur est alors aux prises, non plus avec des phénomènes réels, mais avec des mathématiques. Par exemple, l'Aérospatiale effectue de nombreux calculs d'éléments finis pour simuler divers tests d'aérodynamique ou autre, sur une structure. Un tel calcul nécessite de réaliser au préalable un maillage de la structure. Plus celui-ci sera précis, plus il donnera d'information mais plus les calculs seront longs et coûteux. Le maillage devra donc être plus resserré aux endroits sensibles, c'est-à-dire, là où l'on prévoit des effets importants à observer. Les ingénieurs qui utilisent les logiciels de maillage doivent apprendre à anticiper les résultats de calcul, ce qui leur rend indispensable la pratique des mathématiques. Déjà, au siècle dernier, Heinrich Hertz écrivait: "on ne peut échapper au sentiment que ces formules mathématiques ont une existence qui leur est propre, qu'elles sont plus savantes que ceux qui les ont découvertes et que nous pouvons en extraire plus de science qu'il n'en a été mis à l'origine."

Lorsque la finalité de la recherche est la résolution d'un problème concret, celui-ci impose d'emblée des contraintes très fortes et indiscutables. Un mécanicien des fluides étudie les écoulements en dimension 3 parce que l'espace que nous habitons est tridimensionnel; c'est un fait observé et reconnu. Pour un mathématicien pur, la tridimensionnalité de notre milieu de vie est accidentelle et il n'y a pas lieu à se cantonner à l'étude de la dimension 3. La volonté de se raccrocher au monde réel, contingent, bride l'imagination qui a besoin de liberté pour révéler sa puissance créatrice. L'hypothèse de travailler dans un espace de dimension supérieure pourrait être disqualifiée par le seul fait qu'elle serait jugée trop éloignée de la réalité empirique. Pourtant, un mathématicien appliqué, a récemment abordé l'étude des équations de Navier-Stokes régissant la mécanique des fluides, en dimension 4, en s'étonnant que peu de chercheurs s'y soient penchés. Ses travaux trouveront probablement une utilité, car, s'ils ne concernent pas les fluides au sens commun du terme, ils peuvent modéliser d'autres systèmes à grand nombre d'objets, comme des populations. L'histoire montre qu'un développement mathématique élaboré sans préoccupation utilitaire a des chances d'être appliqué. Selon les mots de Bourbaki, dans Architecture des mathématiques, "Dans la conception axiomatique, la mathématique apparaît en somme comme un réservoir de formes abstraites- les structures mathématiques- et il se trouve sans qu'on sache bien pourquoi- que certains aspects de la réalité expérimentale viennent se mouler en certaines de ces formes comme par une sorte de préadaptation."

Pourtant, les mathématiques de Bourbaki, belle construction intellectuelle, sont bien différentes de celles que nous avons trouvées dans l'industrie. Les ouvrages classiques d'enseignement exposent des théories élégantes qui traitent de problèmes que l'on sait résoudre et rejettent les équations qui n'ont pas de solution explicite. Pourtant, ces équations peuvent être simulées par ordinateur pour donner des solutions approchées. La méthode la plus célèbre de ces mathématiques expérimentales est celle dite de Monte Carlo. C'est aussi la technique qui a été la plus citée au cours de nos entretiens car elle est conceptuellement simple et peut intervenir aussi bien en mécanique

des fluides, qu'en calcul des probabilités ou en mathématiques financières. Elle permet même de calculer  $\pi$ . Pour cela, il suffit de tirer au sort un grand nombre de points dans un carré; la proportion de points à l'intérieur du cercle inscrit dans le carré est une approximation de  $1/4 \pi$ . Un mathématicien pur, de la lignée de Bourbaki, n'apprécie guère cette technique qui introduit le hasard et dépend d'un générateur de nombres aléatoires, mais qui cache aussi des théorèmes de convergence très durs. Les mathématiques de l'industrie ne sont pas les plus esthétiques et les plus sophistiquées. L'approche est souvent plus celle d'un physicien, qui fait des hypothèses, simplifie les équations, néglige des effets.



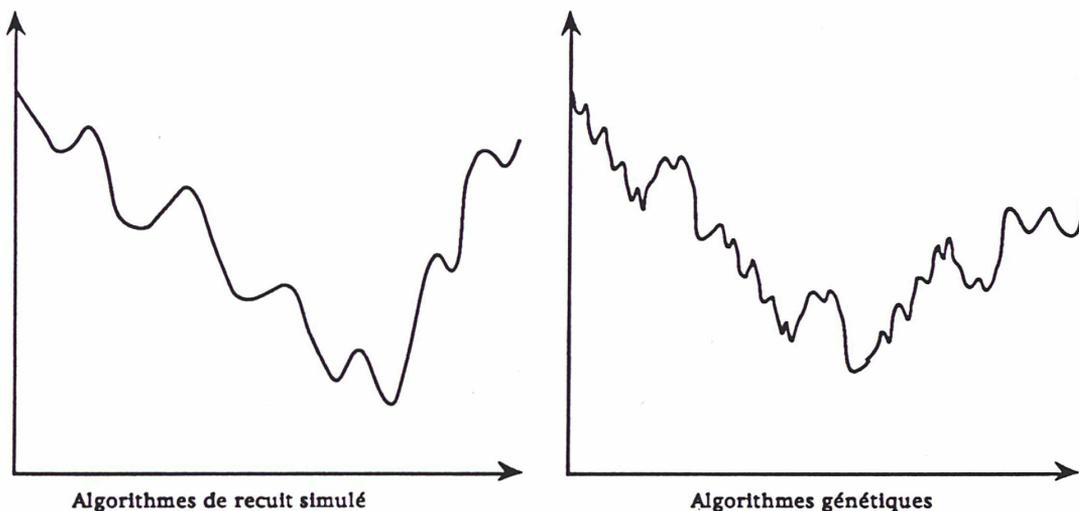
14 points au  
hasard

11 points à  
l'intérieur

3 points à  
l'extérieur

Calcul de  $\pi$  par la méthode de Monte Carlo, ici  $\pi$  est approximé par  $22/7$ .

On retrouve l'influence d'autres domaines scientifiques dans deux autres techniques mathématiques utilisées en optimisation à grand nombre de paramètres : les algorithmes de recuit simulé et les algorithmes génétiques. Lorsque la fonctionnelle à minimiser présente un aspect suffisamment lisse, on utilise en général l'algorithme de recuit simulé, inspiré de la physique statistique. L'analogie consiste à assimiler la fonctionnelle à l'énergie potentielle d'un système d'électrons libres dans un métal que l'on refroidirait. Tout le savoir-faire de l'utilisateur consiste à baisser la température suffisamment lentement de manière à ce que les particules puissent explorer tous les minima locaux.



Les algorithmes génétiques, découverts par un biologiste Néerlandais, sont adaptés aux fonctions moins régulières. Dans cette analogie, il ne s'agit plus de particules, mais d'individus, avec des performances qui leurs sont associées, quantifiées par la fonctionnelle considérée. L'algorithme consiste à marier les individus qui ont de bonnes propriétés, en introduisant des mutations dans leur descendance. L'efficacité de cette technique est conditionnée par le juste réglage du taux de reproduction, du taux de mutation et du taux de mortalité. Encore une fois, ces deux exemples d'algorithmes, dont nous avons entendu parler au cours de la plupart de nos entretiens, sont utilisés dans l'industrie lorsque les méthodes classiques ont échoué, alors que très peu de résultats théoriques ont été obtenus sur leur efficacité.

## 2. Les mathématiques vécues sur le terrain

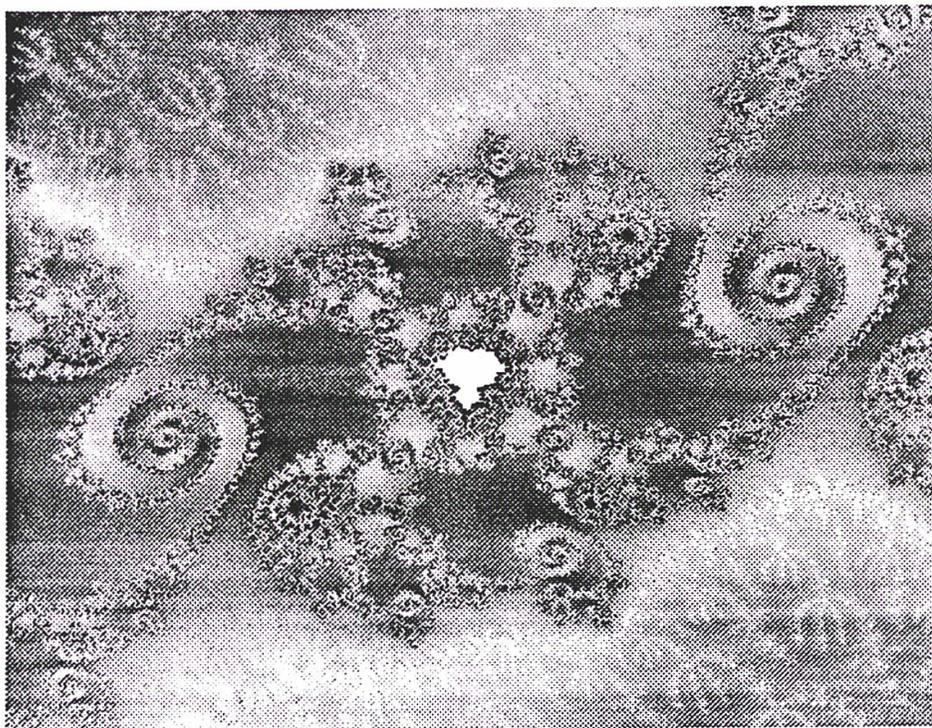
### 2.1. Le marketing des mathématiques

Au cours de nos entretiens en milieu industriel, nous avons cherché à traquer les mathématiques partout où elles sont susceptibles d'être utilisées. A cette occasion, nous avons observé une certaine ambivalence dans la manière dont les mathématiques sont utilisées dans l'industrie : les mathématiques à la fois rassurent et effraient les Industriels. Le premier indice corroborant ce constat nous est apparu dans les premières minutes de nos entretiens. Après avoir annoncé les objectifs de notre étude ainsi que les points qui nous intéressent particulièrement dans le secteur d'activité concerné, la plupart des industriels que nous avons interrogés ont répondu : "Ici, nous ne faisons pas de mathématiques", certains poursuivant par "... nous utilisons des méthodes de Monte Carlo, des algorithmes génétiques, des algorithmes de réseaux de neurones ...". Comment expliquer cette attitude défensive par rapport aux mathématiques, même dans les secteurs d'activité que nous avons classés dans la typologie précédente parmi les plus grands utilisateurs de maths ?

#### 2.1.1. Les mathématiques Qui Font Peur

##### 2.1.1.1. Quelques exemples

Seule notre visite chez Saint-Gobain, où nous pensions trouver peu d'exemples d'utilisation fructueuse des mathématiques, semble contredire l'assertion précédente. Une fois arrivés aux Miroirs à la Défense, nous avons vu accroché au mur dans le bureau du directeur de la recherche un tableau représentant une figure fractale, dont les théories interviennent dans différents domaines de la physique, comme la turbulence ou le traitement du signal.



*Agrandissement de l'ensemble de Mandelbrot*

Ce physicien ancien haut responsable du CNRS a adopté d'emblée une attitude très ouverte, en cherchant à catégoriser toutes les applications des mathématiques réalisées dans les différentes branches du groupe, de la classique simulation numérique de phénomènes thermiques et mécaniques dans les hauts fourneaux de Pont-à-Mousson, jusqu'au contrôle non destructif par ultrasons, de plus en plus répandu dans l'industrie, technique faisant appel aux outils les plus sophistiqués de traitement du signal,

L'utilisation des mathématiques dans l'entreprise peut parfois susciter crainte et suspicion. Nous avons rencontré à la Société Générale le responsable du service de contrôle central des risques. Cette personne a introduit dans la banque le concept de risque courant moyen (RCM), qui permet de quantifier les risques de marché et de contreparties sur les produits dérivés.

Les indicateurs prudentiels (espérances de pertes) jusqu'alors utilisés par les banques étaient basés sur un fractile de la valeur du produit (ex : 95%). Ces indicateurs avaient le défaut d'être statiques, c'est à dire de ne pas évoluer pendant la durée de vie du produit, et de ne pas tenir compte des fluctuations de marché.

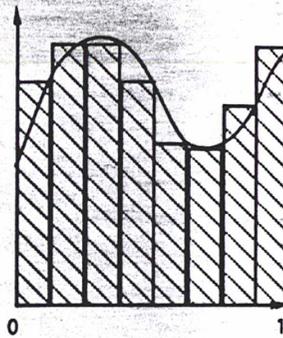
Les outils mathématiques utilisés pour calculer ce RCM sont principalement des méthodes de Monte Carlo appliquées à au calcul stochastique et des techniques statistiques appliquées à l'analyse des variations historiques des indices boursiers par exemple. L'équipe de mathématiciens de ce service est composée de 13 personnes dont 8 stagiaires, recrutés pour leur compétence en mathématiques, mais aussi sur leur intuition physique. En effet, les mathématiques interagissent ici non seulement avec l'intuition physique, mais aussi avec le travail opérationnel de la Banque. Le Risque Courant Moyen permet effectivement d'exercer un contrôle des positions prises par les agents de la société. Ce contrôle n'a été possible qu'après un effort important de communication avec les agences et les directions de marché de la Société Générale. Le système d'information mis en place correspond d'ailleurs à une charge de travail de 10 hommes / an.

La mesure du risque est-elle bonne a posteriori ? L'évaluation de la théorie s'effectue par "back-testing", autrement dit par l'évaluation de contrats hypothétiques à partir des reconstitutions historiques des variations du marché. (Si tel contrat avait été conclu il y a trois ans, que ce serait-il passé ?). Cette méthodologie permet d'ailleurs d'évaluer les performances des nouveaux produits.

Le président directeur général de la Banque accorde une réelle importance à cette activité de contrôle des risques. La preuve en est que le service central de contrôle des risques est le seul service directement rattaché à la Direction Générale de la société, ce qui d'ailleurs n'est pas sans créer des tensions avec les autres services de la Banque.

Pour illustrer cette méfiance par rapport aux mathématiques, voici un exemple pourtant pertinent, puisqu'il s'agit de la preuve du fait que les méthodes de Monte Carlo sont plus performantes que les méthodes déterministes, mais qui seraient probablement mal venue sur le bureau des plus hauts responsables de l'entreprise :

Soit  $\Omega = [0,1]^d$  le cube de volume 1 dans  $R^d$ , où  $d$  est la dimension de l'espace. Soit  $f$  une fonction de  $\Omega$  dans  $R$ . Pour calculer l'intégrale sur  $\Omega$  de la fonction  $f$ , on peut utiliser la méthode des rectangles, qui consiste à approximer la fonction par des fonctions localement constantes. En dimension 1, il suffit de découper l'intervalle  $[0,1]$  et d'approcher la fonction par sa valeur aux bornes des intervalles :



Plus généralement,  $\int_{\Omega} f dx$  est approximée par la méthode des rectangles par  $\sigma_{N^d} = \frac{1}{N^d} \sum_{\substack{1 \leq k_1 \leq N \\ \vdots \\ 1 \leq k_d \leq N}} f\left(\frac{k_1}{N}, \dots, \frac{k_d}{N}\right)$ .

On obtient alors le résultat convergence suivant :  $\left| \sigma_N - \int_{\Omega} f dx \right| \leq \frac{\text{Constante}}{N^{\frac{1}{d}}}$ , où la constante est le maximum sur  $\Omega$  de la valeur absolue de la dérivée de  $f$ .

La méthode de Monte Carlo consiste à approximer  $\int_{\Omega} f dx$  par

$\bar{\sigma}_N = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(X_j)$ , où les  $X_j$  sont des variables aléatoires indépendantes sur

$\Omega$ , c'est à dire des points tirés au hasard dans  $\Omega$ . Si l'on note  $E$  l'espérance mathématique, on obtient l'estimation suivante :

$$\left( E \left( \left( \bar{\sigma}_N - \int_{\Omega} f dx \right)^2 \right) \right)^{\frac{1}{2}} \leq \frac{\sigma(f)}{\sqrt{N}}, \text{ c'est à dire que les moyennes } \bar{\sigma}_N \text{ convergent}$$

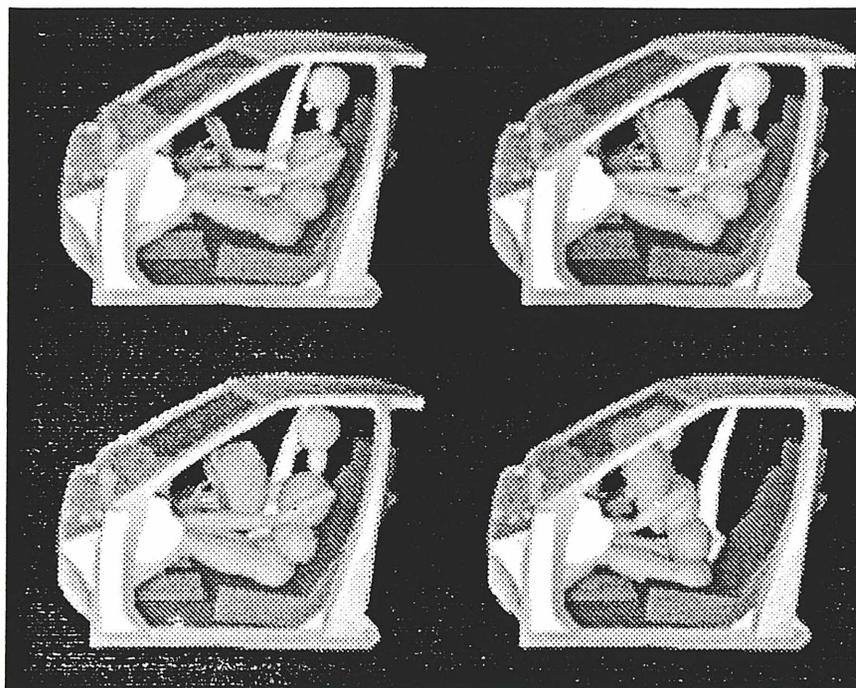
en moyenne quadratique vers  $\int_{\Omega} f dx$  avec une vitesse proportionnelle à  $\frac{1}{\sqrt{N}}$ .

Plus la dimension  $d$  du domaine  $\Omega$  est grande, plus les méthodes aléatoires de ce type sont intéressantes par rapport aux méthodes d'approximation géométrique. La contrepartie de cette meilleure performance est la difficulté de trouver des séries aléatoires. Certains mathématiciens de la Société Générale travaillent sur ce sujet très difficile et déterminant pour développer des logiciels performants.

Voilà un exemple où une méthode qui introduit le hasard est plus efficace qu'une méthode déterministe ! Raison de plus pour le responsable ne pas exposer à sa hiérarchie cette technique, qui fait appel à l'aléatoire, que l'on oppose classiquement à la rationalité mathématique.

PSA non plus n'expliquerait pas ses techniques de simulation aux consommateurs. Au contraire, il vante les test en vraie grandeur de crashes de voiture. Ces tests coûtent extrêmement cher dans l'industrie automobile. Désirant réduire ses coûts et délais de développement, PSA met de plus en plus l'accent sur le développement des techniques de simulation numérique des équations de la mécanique en grandes déformations (très non-linéaires) afin

de simuler les tests de crash et de déploiement d'airbag. Cependant, les consommateurs ne sont pas prêts à acheter une voiture qui ne serait testée que sur ordinateur. Notre interlocuteur a insisté sur l'importance des tests réels dans la communication de PSA, comme en témoignent certains spots publicitaires sur la 406.



*Simulation de déploiement d'airbag*

### 2.1.1.2. Les Dangers de l'Informatique

Dans la plupart des usages industriels, les mathématiques sont intimement liées à l'informatique, qui empiète sur le territoire d'autres sciences et est source d'erreurs.

Le coût du calcul devenant un facteur limitant, l'informaticien se voit accorder une part grandissante dans le traitement du problème. Plus on veut optimiser les possibilités d'un ordinateur, plus il faut tenir compte tôt des contraintes qu'il impose. Ainsi, le choix d'une architecture parallèle diminue les temps de calcul mais se répercute en amont en imposant une méthode mathématique. S'il s'agit de résoudre une équation aux dérivées partielles sur un domaine physique, on devra par exemple découper le domaine d'une façon compatible avec la disposition des processeurs en parallèle. De la même façon, pour la résolution de systèmes linéaires  $y = Ax$ , qui interviennent constamment en analyse numérique, les méthodes de pivot de Choleski (décomposition de la matrice à inverser  $A$  en  $LDL^T$ , où  $L$  est triangulaire et  $D$  diagonale) s'avèrent plus adaptées au calcul parallèle que les méthodes itératives jusqu'alors utilisées en calcul vectoriel. Ainsi, l'informatique influe sur la modélisation même du problème.

D'autre part, les défauts de programmation dans le domaine de la simulation numérique ou plus généralement du logiciel peuvent générer des problèmes considérables. Par exemple, sur un très grand nombre d'ordinateurs, les années sont stockées sous forme de deux octets, à partir desquels sont effectuées des quantités d'opérations, notamment dans les banques (des calculs d'intérêt par exemple utilisent des différences de dates, ce qui posera des problèmes au passage à l'an 2000). Certaines entreprises américaines ont pris conscience des conséquences du passage à l'an 2000 sur

leurs logiciels et ont massivement investi pour prévenir les désagréments : Pacific Union, compagnie de chemin de fer américaine, a investi 30 millions de dollars sur 5 ans pour modifier son logiciel de gestion du trafic.

Malgré un environnement de plus en plus convivial permettant d'éviter les erreurs de programmation et de modélisation, les erreurs d'arrondis sont une source inévitable de problèmes notamment pour la modélisation de systèmes chaotiques que l'on trouve en mécanique des fluides. En effet, les nombres réels n'existent pas sur un ordinateur, ce dont très peu de numériciens que nous avons rencontré se préoccupent. Les systèmes dynamiques chaotiques, comme les équations de la météorologie, sont caractérisés par une grande sensibilité aux conditions initiales : deux états initiaux infiniment proches s'éloigneront l'un de l'autre inexorablement pour ainsi donner naissance à deux histoires totalement différentes. En raison des erreurs d'arrondis, le résultat final dépend fortement du mode d'implémentation de l'algorithme. Lorentz décrivait ce phénomène en disant qu'un battement d'ailes de papillon à un endroit donné pouvait à terme entraîner un cyclone à l'autre extrémité de la terre.

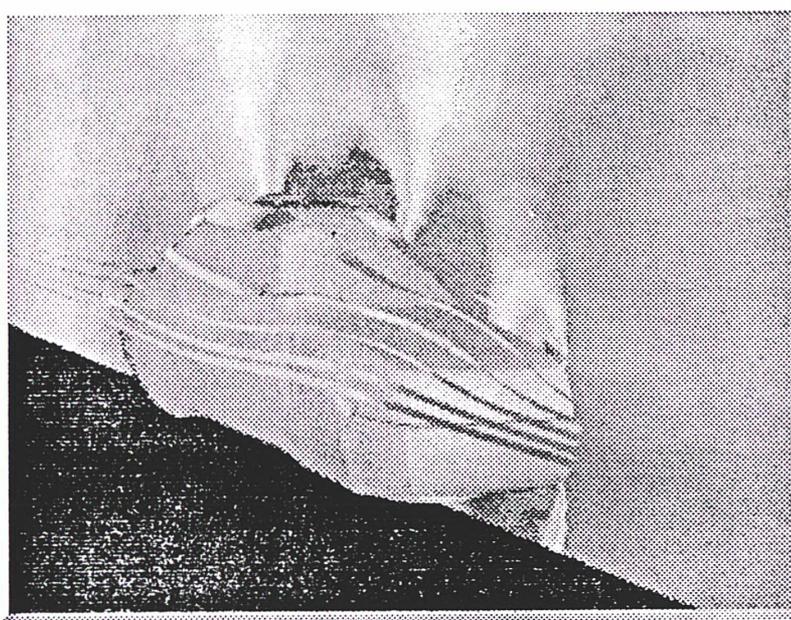
Enfin, plusieurs de nos interlocuteurs, notamment à l'Aérospatiale, nous ont fait part de leur inquiétude : l'augmentation continue de la puissance des ordinateurs permettra aux entreprises dans quelques années d'investir beaucoup moins dans la recherche d'algorithmes performants dans le domaine de l'analyse numérique. Les mathématiciens russes sont connus pour avoir développé des algorithmes plus performants que les Américains, alors qu'ils disposaient de ressources informatiques beaucoup moins puissantes. L'utilisation de logiciels standardisés sur des machines de plus en plus puissantes ne laissera-t-elle pas place à une certaine paresse intellectuelle ?

## 2.1.2. Les mathématiques cachées

Conséquence logique de cette méfiance des industriels pour la formalisation mathématique des problèmes, les mathématiques le plus souvent cachées non seulement dans les produits de l'entreprise, mais aussi dans la communication des centres de recherche à leur hiérarchie.

### 2.1.2.1. Les mathématiques cachées dans les produits

PSA est un des meilleurs exemples montrant à quel point les mathématiques interviennent dans la fabrication d'une voiture, produit d'usage quotidien. Alors qu'il est devenu très difficile d'identifier les composants de son moteur de voiture, compact et monobloc, les mathématiques interviennent de plus en plus dans le processus de fabrication :



*Calcul d'aérodynamique*

\* Utilisation du calcul symbolique pour les calculs d'engrenages.

\* Les systèmes pilotés, de plus en plus utilisés dans l'automobile, qui nécessitent l'implémentation de lois de commande, et l'utilisation massive du filtrage de Kalman et de la méthode appelée LQG. Les composants concernés sont les suivants :

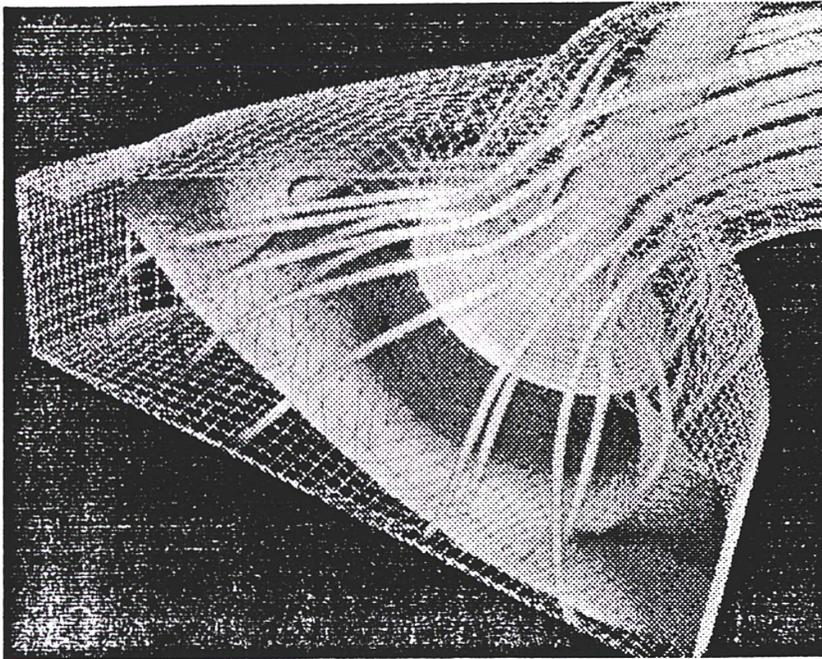
- le calculateur d'injection d'essence, devenu indispensable, car les carburateurs ne passaient plus les normes de pollution (un carburateur endommagerait le catalyseur).

- Les boîtes automatiques (5 à 6% du marché Français).

- La suspension hydraactive de la XANTIA ACTIVA, qui met en jeu des lois de commande de type bang-bang, pour passer de l'état de suspension ferme à celui de suspension souple, afin de rattraper le roulis dans les virages de manière optimale, donnant ainsi l'impression que le véhicule reste parfaitement horizontal.

- le système de freinage ABS.

- le système de régulation automatique de la vitesse des essuie-glaces en mode vitesse intermittente sur la 406 en fonction de la quantité d'eau qui tombe sur le pare-brise (qui fonctionne par un système de réflexion infra-rouge), aussi contrôlé par un calculateur.



*Valve de Ford*

\* Les problèmes de comportement routier, pour lesquels il n'existe pas de logiciels généraux dans le commerce. Pour étudier les phénomènes de sortie de route en tête à queue lorsque le conducteur lève brusquement le pied à une certaine vitesse critique, PSA a développé son propre logiciel de calcul symbolique, ayant besoin d'une simulation très fine des liaisons de la voiture :  $6 \times 4 = 24$  liaisons, dont 15 sont indépendantes. Le but de la démarche étant d'arriver à un modèle simple pour réaliser un simulateur de conduite en temps réel.

\* Simulation des équipements électroniques.

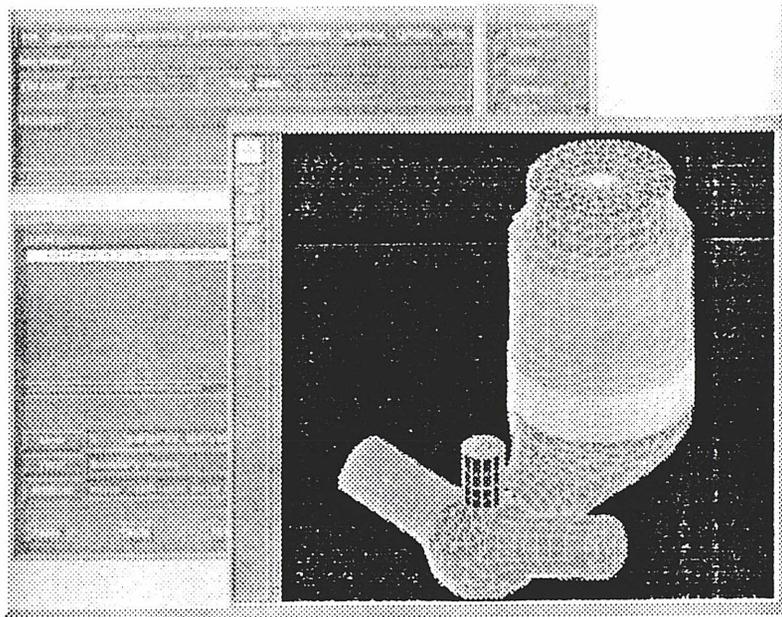
\* La mécatronique, fusion de trois mots qui désigne la mécanique, utilisée conjointement avec les lois de commande hydraulique et l'électronique, qui intervient dans la direction assistée et le système piloté sur la voiture qui succédera à la XM. Le problème consiste à mettre en forme les équations du système, et surtout d'en trouver la forme la plus adaptée aux méthodes les plus performantes d'analyse numérique. Dans le cas présent, PSA a fait appel à des laboratoires d'universités, qui ont utilisé des propriétés des systèmes dynamiques, des transformées de Legendre et des Groupes de Lie.

\* Les problèmes de compatibilité électromagnétique : il s'agit d'éviter que les systèmes électroniques de la voiture (de plus en plus nombreux) soient perturbés par les émissions extérieures. PSA utilise les premiers codes de calcul performants développés récemment.

\* Les problèmes d'aérothermique très importants, car la température est plus élevée sous le capot des voitures récentes, les pots catalytiques étant isolés, donc plus chauds. PSA effectue des calculs thermiques avec rayonnement et convection.

\* Le domaine de l'acoustique et des vibrations, stratégique pour PSA, qui investit des sommes importantes pour limiter le bruit extérieur et intérieur de ses voitures. Une voiture représente 10000 pièces, dont 200 sont susceptibles de faire du bruit. Ces phénomènes nécessitent l'étude des problèmes de couplage solide - fluide - acoustique encore très peu répandue.

Notons enfin qu'il existe de plus en plus de domaines où le calcul est admis dans la certification des produits (codes certifiés).



*Utilisation d'un logiciel de maillage*

D'autre part, notamment lorsqu'elles interviennent dans la conception de logiciels, les mathématiques sont complètement invisibles. Même dans les traitements de texte que nous utilisons quotidiennement, les mathématiques sont omniprésentes : du correcteur orthographique ou grammatical, qui utilisent des mathématiques très compliquées comme la théorie des langages, aux polices de caractère de certains traitements de texte, dont la définition passe par des courbes algébriques ou B-Splines précédemment évoquées pour la conception des voitures.

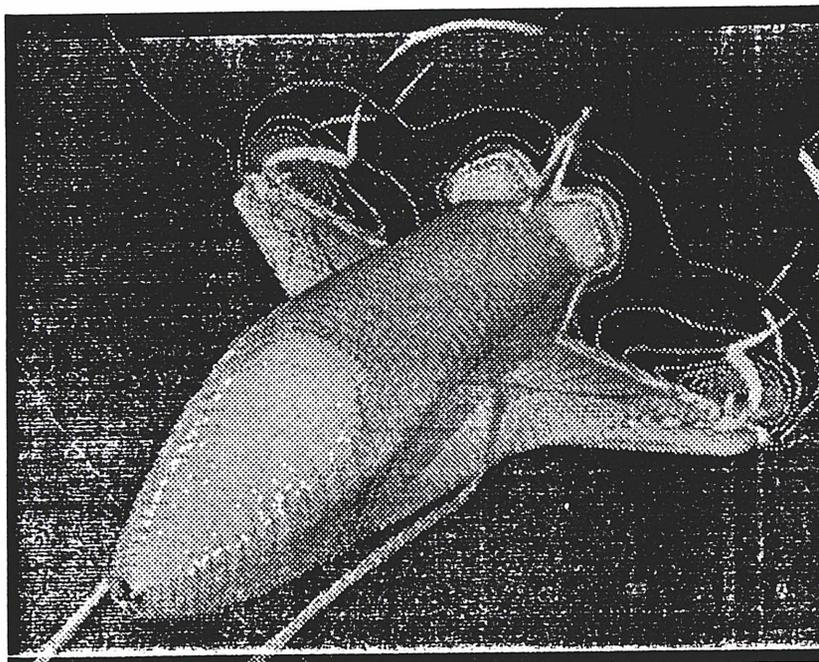
Enfin, le caractère caché des mathématiques intervient également dans la législation. L'exemple singulier relevé lors de notre entretien chez PSA concerne une législation qui repose sur la théorie de la statistique séquentielle, dont la motivation part du principe que l'on ne peut pas contrôler tous les véhicules qui sortent de la chaîne. Il faut donc faire des prélèvements sur la chaîne qui ne se traduisent pas par des moyennes, mais plutôt par un test, duquel on est autorisé à sortir dès que le résultat est assez probant (3 véhicules sont au minimum contrôlés, 32 au maximum). A l'aide d'un laboratoire de l'Ecole Normale Supérieure, PSA a réussi à comprendre les lois de distribution du processus et les méthodes utilisées (de type Monte Carlo), ce qui a permis d'identifier les paramètres à examiner plus attentivement dans une voiture (les NOx, CO, les hydrocarbures imbrûlés pour le réglage antipollution par exemple).

#### 2.1.2.2. Les mathématiques cachées dans les chiffres et dans les images

Comment alors les centres de recherche communiquent leurs résultats aux décideurs de l'entreprise ? Dans un certain nombre de cas, à l'Aérospatiale, l'échange d'information se limite à la communication d'un seul chiffre : le calcul de fiabilité d'Ariane 5, qui nécessite l'utilisation de méthodes probabilistes de type Monte Carlo, est de 98.5%. Pour faire ces calculs, l'ingénieur est obligé de faire des hypothèses et des approximations qu'il ne justifie pas auprès de sa hiérarchie.

Quand il s'agit de valider le choix d'une géométrie pour un produit, éventuellement obtenue par optimisation de forme, la communication passe par l'image, dont l'interprétation peut parfois être faussée par le côté

esthétique. Ainsi, la couverture d'un exemplaire du journal de l'Aérospatiale représente un hélicoptère avec différents niveaux de couleurs, que l'on pourrait assimiler à un calcul d'aérodynamique ou de thermique. Ce n'est qu'en tournant la première page que l'on découvre qu'il s'agit d'un calcul de compatibilité électromagnétique.



*Calcul d'aérodynamique sur la navette spatiale Américaine*

Michelin, dans sa publicité du début des années 90, est un exemple suffisamment rare d'utilisation des mathématiques comme argument de vente pour être mentionné : alors que l'on voit un ingénieur écrire à la craie des équations incompréhensibles à l'emplacement de la ligne blanche, la voix-off s'émerveille devant les kilomètres d'équations que les ingénieurs de Michelin auront dû écrire pour aboutir à la fiabilité des pneus fabriqués par l'entreprise. Michelin est d'ailleurs une entreprise très particulière dans le monde de l'industrie automobile, car, à l'inverse de PSA, cette entreprise est connue pour ne quasiment rien publier des résultats de ses recherches. Un petit nombre d'entreprises considèrent ainsi les mathématiques comme un domaine stratégique de leur recherche-développement et de leur communication.

### **2.1.3 Les mathématiques qui rassurent**

#### **2.1.3.1. Exemple de la Société Générale**

La direction de marché qui traite des options sur actions et indices boursiers utilise des mathématiques très complexes pour le développement et la mise à jour de ses logiciels de tarification d'options. Les activités de cette direction sont séparées par marché géographiques et par type de trading : arbitrage, market making, proprietary trading, et activités purement commerciales.

Le prix des options sur action dépend

- 1°) du taux d'intérêt,
- 2°) du prix de l'action,
- 3°) des dividendes.

4°) de la volatilité, définie comme l'écart-type des logarithmes des rendements,

5°) de la maturité de l'option,

et fait donc intervenir des outils mathématiques sophistiqués. Dans le cas où aucun dividende n'est distribué, les modèles correspondants font intervenir des équations aux dérivées partielles paraboliques du type de

l'équation de la chaleur  $\frac{\partial f}{\partial t} - \Delta f = g$ , dont la formule intégrée porte le nom

célèbre de Black&Sholes. Cependant, dès que l'on doit prendre en compte des barrières désactivantes, des dividendes, ou dès que l'option porte sous plusieurs sous-jacents (exemple : max (CAC 40, Dow Jones)), cette formule n'est plus valable et doit être remplacée par des techniques complexes d'analyse numérique (schémas de Cox Rubinstein) permettant de contourner les difficultés liées aux singularités du schéma discret associé.

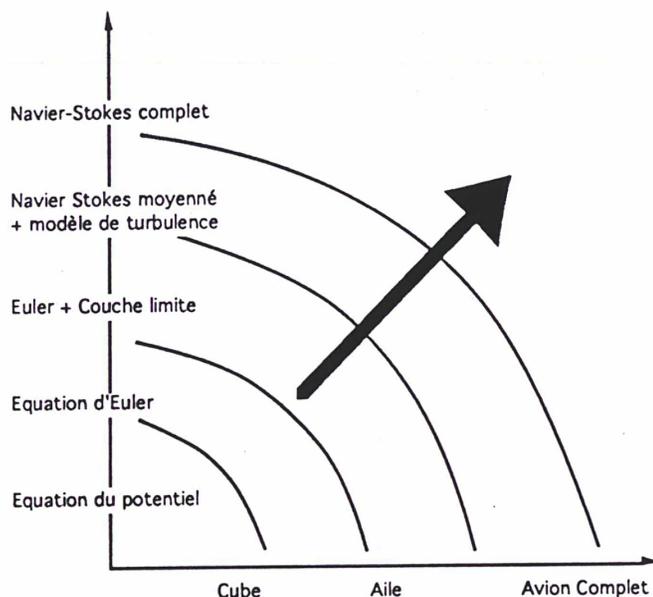
Dans quelle mesure les techniques mathématiques apportent-elles une valeur ajoutée par rapport à la simple intuition du trader expérimenté ? En ce qui concerne les produits dérivés de première génération (ex : options avec barrières désactivantes), la réponse n'est pas très claire et l'intuition vaut souvent mieux que les calculs. Mais dès que l'on considère les produits de deuxième génération comme les options digits, l'intuition devient trompeuse.

Les mathématiques permettent donc au trader d'avoir un prix très rapidement calculé de manière de plus en plus précise, grâce à l'augmentation de la puissance des ordinateurs et à l'amélioration des algorithmes numériques : en 1985, les marges sur ces produits étaient de l'ordre de 2%. Actuellement, alors qu'elles ne sont plus que de 0.1%, les logiciels ont été améliorés de manière à déterminer des prix avec une précision de 0.05%. Sur les options de change, toutes les banques utilisent les mêmes modèles mathématiques : c'est sur les modèles correspondant aux options sur actions et indices boursiers que les banques peuvent se différencier et acquérir des avantages compétitifs par rapport à leurs concurrentes. Cette direction de marché comprend 300 personnes, dont une dizaine de mathématiciens (deux d'entre eux entretiennent des contacts avec des professeurs de l'université pour se tenir au courant des derniers résultats dans le domaine des mathématiques financières). Les postes de travail des traders et des mathématiciens sont exactement les mêmes : un bureau avec un ordinateur et un téléphone. Pour les différencier, on appelle les traders "F10 men" car la touche de leur clavier qu'ils utilisent le plus souvent est la touche F10 pour obtenir un prix, alors que les mathématiciens utilisent presque toutes les touches de leur clavier !

#### 2.1.3.2. Les gains de productivité liés aux maths

##### **L'ONERA**

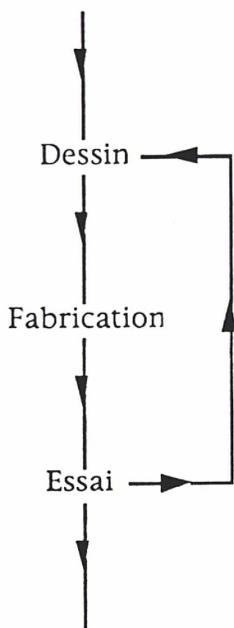
L'ONERA fut pionnière dans le développement et l'application des techniques d'analyse numérique en aérodynamique. A la fois à travers l'augmentation de la puissance des ordinateurs et l'amélioration des schémas numériques de résolution, les progrès de la recherche ont permis de simuler des géométries et des modèles de plus en plus proches de la réalité. La figure ci-dessous représente l'histoire des avancées des techniques de simulation dans le domaine de la mécanique des fluides. Comme nous l'a exposé le directeur des applications aéronautiques, c'est une onde de progrès que l'on peut dater.



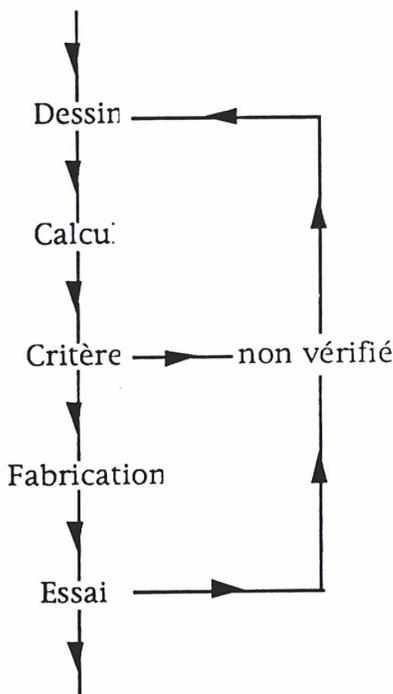
### PSA

De la même façon, l'introduction massive chez PSA de l'expérimentation virtuelle a entraîné des économies et un gain de temps considérables. Le mathématicien du centre de recherche de PSA représente ce progrès par le croquis ci-dessous. Le but est de diminuer le délai de rétroaction des essais sur le dessin pour améliorer la réactivité au cours de la conception.

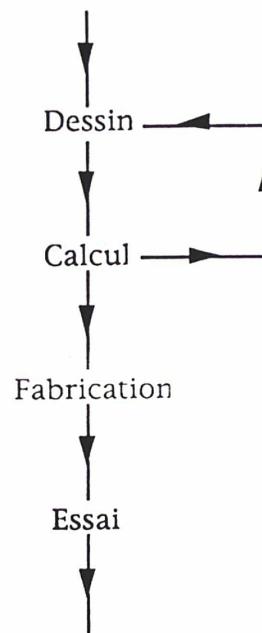
#### Schéma traditionnel



#### Schéma intermédiaire



#### Schéma cible



#### 2.1.3.3. L'esprit de Géométrie

Dans d'autres cas, la valeur ajoutée des mathématiques provient de la rigueur de la démarche. Les chercheurs du laboratoire de géostatistiques de l'Ecole des Mines de Paris nous ont présenté leur activité en disant : "la géostatistique, c'est 10% de mathématiques, et 90% de bon sens". Ainsi, des exploitants d'une concession de diamants en Angola avaient fait appel au

centre de géostatistique après avoir contacté vainement des experts du domaine : leurs prévisions, calculées à partir des échantillonnages, ne donnaient pas de résultats satisfaisants. Il s'avère que ces mauvaises prévisions étaient dues au non respect des procédures d'échantillonnage, les ouvriers ne forant pas précisément à l'endroit prescrit, suivant la friabilité de la roche. Un peu de la même façon que dans l'entreprise, la certification rassure, parce qu'elle implique que tout un travail en amont a été effectué, les mathématiques apportent une valeur ajoutée par tout le travail nécessaire pour vérifier les hypothèses qui sous-tendent les théories mathématiques.

Nous avons par ailleurs mis en évidence un exemple extrême d'utilisation des mathématiques dans l'industrie à travers le caractère cartésien de la démarche. Désirant initialement savoir comment les mathématiques s'insèrent dans les processus d'ingénierie concourante, nous avons rencontré le spécialiste de ce domaine à l'Aérospatiale. L'ingénierie concourante consiste en la confection d'une maquette virtuelle, système interactif multimédia rassemblant toutes les données définissant le produit, destinée à coordonner les différents acteurs de l'entreprise et à présenter aux clients les fonctionnalités du produit. Plus que détailler le rôle des mathématiques dans les maquettes virtuelles, cette personne nous a exposé son projet de théorie de la productique, qu'il avait l'intention de formaliser comme une construction mathématique. Pour lui, "l'héritage papier" marque encore trop l'utilisation de l'informatique, qui ne s'est pas émancipée des habitudes consacrées par le temps. L'industrie doit repenser de fond en comble sa productique et pour cela poser les problèmes de manière cartésienne. Cela amène notamment ce chercheur atypique à remettre en question l'idée classique de ce qu'est un lanceur, en le définissant comme un moyen de mettre en orbite des satellites.

## **2.2. Les différents modes de coopération des mathématiques et de l'industrie**

### **2.2.1. Les mathématiques existantes appliquées aux problèmes concrets**

Les cas où des théories issues de la recherche académique ont trouvé une application à des produits industriels sont rares. Les prototypes en sont la théorie des corps finis utilisée en codage et la théorie des nombres en cryptographie. Plus souvent émergent dans l'industrie des problèmes déjà formulés en termes mathématiques dont la résolution conduit à des développements intéressants sur le plan scientifique. Ainsi, une entreprise qui veut optimiser la forme de verres correcteurs à double foyer fait appel à une unité associée du CNRS qui résout la question posée pour quelques centaines de milliers de francs. Pour l'industriel, le contrat est peu coûteux; pour le mathématicien, outre l'entrée d'argent il est l'occasion de publier un article. Les deux parties sont satisfaites; pourtant, comme nous le montrons plus loin (partie 3), ce type de contrats représente un faible volume.

Certaines PME proposent un mode de coopération similaire. Elles sont nées d'idées mathématiques originales qu'elles adaptent à des cas concrets que des entreprises leur soumettent.

Par exemple, la société ArtSciMed (Art, Science, Media), qui a été fondée en 1989 par Eyal Cohen, docteur en physique, et emploie aujourd'hui 24 personnes, applique les méthodes de la physique des particules à des simulations très diverses. Le point de départ est un ensemble de puissants algorithmes capables de simuler et visualiser des systèmes formés d'un grand nombre d'objets en interaction. Ces objets peuvent représenter des molécules, des poussières, des cellules ou des êtres humains. Les mêmes

algorithmes peuvent donc servir à simuler les impacts de gouttes de pluie et l'action d'un essuie-glace sur un pare-brise, les salissures projetées par les pneus de tracteur, ou encore le déplacement de la pollution, le mouvement des globules dans le sang, et même le déploiement de coussin gonflable (airbag), considéré comme un assemblage de petits éléments mus par le choc des molécules de gaz. Les applications les plus en vogue concernent les images de synthèse pour la vulgarisation scientifique ou pour l'infographie artistique où les systèmes de particules parviennent bien à rendre l'apparence du feu, de la fumée, du sable. Enfin, ArtSciMed a développé un logiciel de simulation de flux de piétons, qui modélise une foule dont chaque individu a un comportement spécifié, et qui intéresse les architectes, les aménageurs, les experts en sécurité.

Autre PME commercialisant des solutions mathématiques, Neuristic s'est spécialisée dans les réseaux de neurones. Le principe en est simple: le réseau reçoit en entrée des données, en produit une sortie qui est comparée au résultat; puis la différence est rétro-propagée pour modifier chaque neurone. Après ce processus d'apprentissage, un réseau de neurones pourra donner des prévisions à partir de statistiques, comme celles de Bison futé sur la circulation, ou reconnaître de l'écriture, de la parole; les applications sont multiples.

Enfin, sont présentes sur le marché des mathématiques prêtes à l'emploi, mettant en oeuvre des méthodes éprouvées. A l'Aérospatiale, par exemple, les numériciens achètent les logiciels de mécanique des fluides, à usage général, du commerce et ne développent de code de calcul que lorsqu'il s'agit d'algorithmes plus spécifiques non disponibles. Ils ont eux-mêmes mis en vente un logiciel d'électromagnétisme.

Dans tous les modes de coopération précédemment décrits, l'industrie exploite des mathématiques qui se trouvaient déjà dans des livres, des laboratoires, des PME ou des logiciels.

### 2.2.2. Les modes de coopération interdisciplinaires

Lorsque dans l'industrie, un problème est posé, qui ne correspond pas à la segmentation traditionnelle des disciplines scientifiques, le besoin en mathématiques est confusément ressenti mais non clairement formulé.

Chez Thomson, c'est le Laboratoire Central de Recherche (LCR) qui intervient dans ce cas. L'unité opérationnelle activités sous-marines avait eu un projet de sonar dans lequel des processeurs devaient travailler et dialoguer ensemble. Cela nécessitait quelque recherche que les ingénieurs de l'unité tentèrent de mener eux-mêmes. Après deux ans de développement, conscients de la complexité de la question, ils cherchèrent du secours auprès LCR qui les aida à poser le problème et les convainquit de s'adresser à des universitaires. Pendant un an et demi, les ingénieurs voyaient peu de résultats venir des universitaires et les soupçonnaient de profiter du financement de Thomson. L'unité opérationnelle s'en est donc remis au LCR qui a formé une équipe avec un universitaire, un doctorant et un de leur membre. Cette équipe a pu travailler avec les deux communautés du calcul parallèle et de la programmation logique par contrainte, qui sont peu habituées à communiquer. Cet exemple montre la difficulté qu'il y a à évaluer l'état d'avancement d'un projet de recherche et anticiper les résultats en cours d'élaboration, lorsque l'on s'aventure en terrain inconnu, non balisé. La mission est arrivée à son terme avec succès mais, pour des raisons de confidentialité, la thèse n'a pu être diffusée hors de Thomson. Le rapprochement entre deux disciplines qui s'ignoraient, l'équipe moitié industrielle moitié académique n'ont duré que le temps du projet et leurs résultats n'ont pas été divulgués. Ces mathématiques, conçues localement dans un but précis, laisseront probablement peu de traces.

La morphologie mathématique, autre exemple de science située au confluent de plusieurs disciplines, illustre bien l'ambivalence des mathématiques qui sont à la fois théoriques et pratiques. Alors qu'il faisait des études de granulométrie minière, Georges Matheron, Ingénieur des Mines, a créé la morphologie mathématique de toutes pièces, réinventant au passage des résultats connus. Cette science est aujourd'hui étudiée pour elle-même, devenue "morphology" elle a perdu son appellation mathématique en traversant l'Atlantique. Bien qu'elle présente un cadre mathématique des plus purs s'inscrivant dans la théorie des treillis qui a toute l'abstraction de l'algèbre, la morphologie mathématique reste, pour l'expert en analyse d'image, une méthodologie consistant à transformer une image par des opérateurs dans le but d'en extraire l'information souhaitée. Les transformations morphologiques peuvent toutes se déduire de l'opérateur de dilatation. Le passage au complémentaire fournit l'opérateur d'érosion, puis par combinaisons successives on obtient toute une hiérarchie d'opérateurs. En pratique, on se réfère moins à la définition d'un opérateur qu'à son action opératoire, à l'effet qu'il produit. On peut être un bon praticien sans connaître les détails de la théorie et un bon théoricien n'est pas le mieux armé pour aborder les problèmes pratiques.

### 3. La gestion de la recherche

Traditionnellement, les entreprises expriment un besoin de mathématiques ont trois manières de procéder : soit elles effectuent les développements correspondants en interne, soit elles embauchent un étudiant en thèse, soit elles font appel aux compétences d'un laboratoire académique sous la forme d'un contrat.

#### **3.1. Les mathématiques en recherche - développement**

Lorsqu'elle dispose en son sein des compétences en mathématiques adaptées à ses besoins, l'entreprise utilise les mathématiques en interne, à travers le travail d'ingénieurs qui n'ont pas nécessairement une formation de mathématiciens. Certains ont en effet des diplômes de physique, d'informatique, les aspects de modélisation et d'algorithmique étant déterminants pour l'entreprise. Parmi les 1000 chercheurs de Saint-Gobain, seuls une dizaine ont été recrutés avec une formation de mathématicien.

La Division Opérationnelle Systèmes, traditionnel point d'entrée du recrutement à l'Aérospatiale, est composée de 780 personnes, dont 80% d'ingénieurs et 6 thésards CIFRE. Le budget de fonctionnement de ce laboratoire s'élève à 35 MF, dont 400 KF consacrés à la communication (colloques et congrès). Cette division, spécialisée dans l'analyse de mission, l'hydrodynamique, l'aérodynamique, la thermique, la propulsion, l'électromagnétisme et la mécanique des structures, travaille avec la division Industrie pour les trois autres divisions Espace, Défense et Satellites de l'Aérospatiale. Une partie des codes de calcul d'aérodynamique et de thermique sont sous-traités auprès de l'ONERA; seules sont conservées en interne les applications spécifiques et les activités à faible temps de retour sur investissements comme le développement de logiciels, notamment en électromagnétisme.

Dans un contexte de réduction des budgets de la Défense, les grands projets se font de plus en plus rares : le développement du successeur du M45, le missile M5, n'a toujours pas été décidé; derrière Ariane 5 ne se profile pas de projet Ariane 6, et le projet Hermès a été abandonné, même si on reparle actuellement des vols habités. Le département de simulation des techniques opérationnelles de l'Aérospatiale, dont l'activité est à 70% de la conception de logiciel (ex : logiciels de simulation de bataille) avec un budget total en décroissance suite à la réduction des financements militaires, voit son budget recherche diminuer au profit de la conception des interfaces de logiciels, de plus en plus déterminante en matière commerciale.

Ainsi, les grands groupes ont tendance actuellement à externaliser une partie de leur recherche et à ne plus garder en interne que les domaines stratégiques. Par exemple, les Bell Labs, qui représentaient encore il y a quelques années plus de 1000 chercheurs, pour un budget équivalent au tiers de celui du CNRS, vont fermer leurs portes. On y faisait des recherches des plus fondamentales aux plus appliquées : 3 millions de dollars ont en effet été investis en 5 ans pour développer des systèmes de reconnaissance de caractères manuscrits pour la lecture automatique de chèques. Les techniques mises en oeuvre sont les théories développées dans les années 60 par Vapnik sur les réseaux de neurones. Pour tester les algorithmes correspondants, les chercheurs ont eu besoin d'un grand nombre de données statistiques et donc rester en contact avec des phénomènes réels. De même, IBM maintenait jusqu'à un passé récent une forme de mécénat en soutenant

des recherches en astronomie dans son centre de Watson (50 astronomes y étaient employés).

### 3.2. Les Docteurs et l'Industrie

Autre moyen d'utiliser les Mathématiques, les contrats CIFRE répondent à un besoin d'une plus grande flexibilité pour l'entreprise, qui n'a qu'une obligation morale d'embauche, et bénéficie d'un cofinancement substantiel de l'Etat.

#### 3.2.1. Les conventions CIFRE

Ces contrats sont financés par le Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MENESR). La convention CIFRE est une association de trois partenaires :

1. Une entreprise qui embauche sur contrat à durée déterminée ou indéterminée.
2. Un diplômé d'école d'ingénieur, de commerce ou de gestion ou un diplômé d'université possédant un DEA et désirant entreprendre un doctorat dans le cadre d'une entreprise (niveau BAC + 5).
3. Un laboratoire universitaire ou autre qui assure l'encadrement de la thèse.

Pour l'entreprise, la convention dure 3 ans et prend la forme d'une subvention d'exploitation. Le jeune cadre est embauché par l'entreprise sur un contrat de travail à durée déterminée ou indéterminée. La subvention forfaitaire versée à l'entreprise était de 92 700 F en 1994. Cette subvention correspond à un salaire brut annuel plancher de 128 400 F (charges sociales non associées).

Notons que quelques entreprises préfèrent embaucher des thésards avec une bourse du ministère de la recherche. Sa durée est de deux ans, avec possibilité d'obtenir une troisième année après examen de l'état d'avancement des travaux (environ 90% des étudiants bénéficient de la troisième année). Le montant mensuel brut correspondant est de 7400 F. Le mode de recrutement et de financement des thèses dépend des habitudes et de la culture de l'entreprise considérée :

\* Elf Aquitaine : Cette entreprise subventionne annuellement 200 bourses de thèse, soit totalement, soit en cofinancement avec des organismes publics.

\* Total : Différentes aides à la formation doctorale sont proposées à des jeunes ingénieurs et universitaires : bourses cofinancées avec le CNRS, bourses post-doctorales de 2 ans.

\* Bull : le groupe BULL accueille annuellement une quarantaine d'étudiants de 3e cycle pour la préparation d'une thèse de doctorat. Deux types de financement sont possibles :

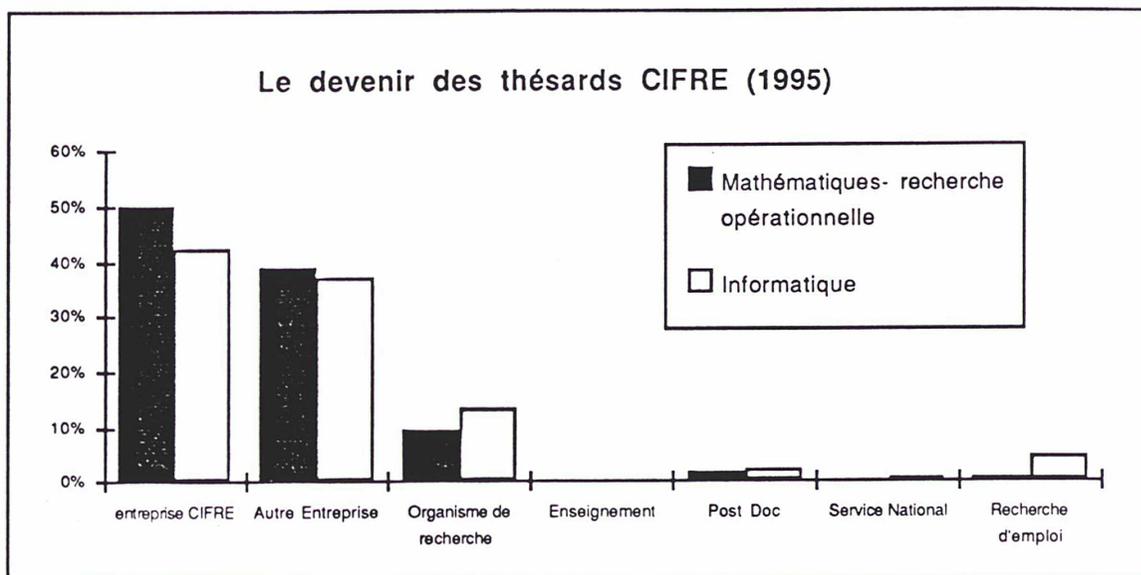
1. Convention CIFRE : 10 par an.
2. Bourse de thèse : 15 à 20 par an.

\* IBM : cette entreprise propose  
- des stages de "thésards" : organisés pour de jeunes diplômés préparant un doctorat.

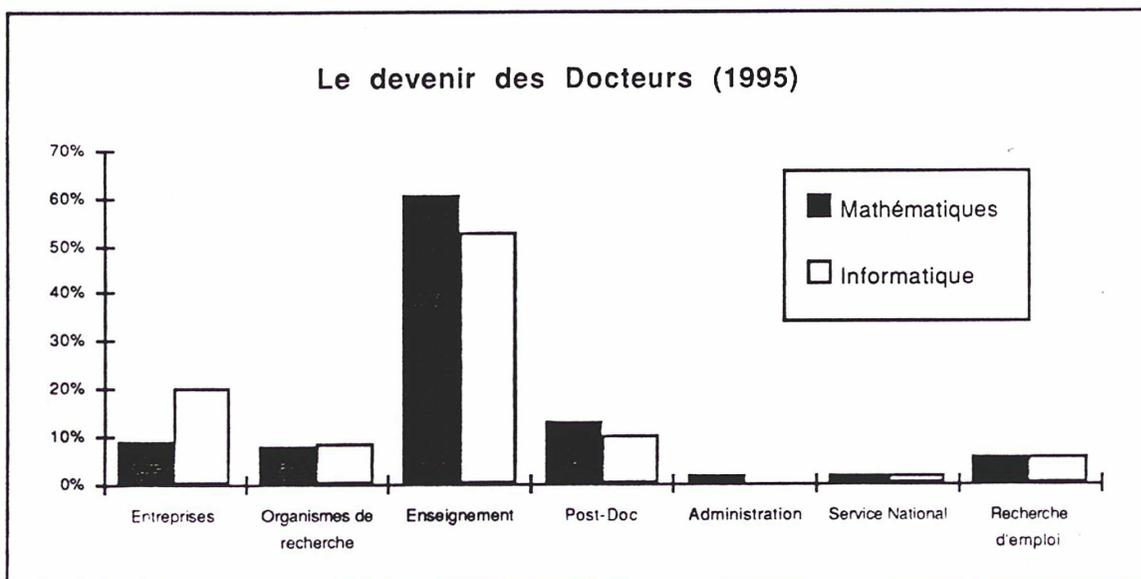
- des séjours post-doctoraux : proposés à de jeunes chercheurs confirmés pour qu'ils découvrent les 4 laboratoires de recherche IBM dans le monde.

### 3.2.2. Le devenir des docteurs

Après liquidation de la convention CIFRE, si 50% des thésards sont embauchés par leur entreprise d'accueil, près de 40% trouvent un emploi chez un concurrent. En termes de salaires d'embauche, les jeunes chercheurs sont payés en moyenne 120 à 140 KF net par an.



Les thésards CIFRE représentent d'ailleurs plus de la moitié des débouchés dans l'entreprise de la totalité des docteurs, qui sont environ 300 en Mathématiques et 700 en Informatique. Quant aux docteurs qui effectuent un ou deux ans d'études post-doctorales, ils se destinent en majorité vers la recherche académique.



Avoir eu une expérience en milieu industriel donne donc beaucoup plus de chances à un thésard de trouver un emploi dans l'entreprise.

### 3.3. Les Contrats

Lorsqu'elle ne dispose pas en interne des compétences dont elle a besoin, l'entreprise peut faire appel à un laboratoire académique, la coopération prenant la forme d'un contrat, souvent associé à une convention CIFRE. Nous avons identifié principalement trois modèles de gestion de la recherche en mathématiques.

#### 3.3.1. Le modèle CNRS

Afin d'étudier l'importance des contrats industriels dans les laboratoires qui font les recherches les plus fondamentales en Mathématiques, nous avons fait le choix de nous focaliser sur le CNRS. Même si les chercheurs en mathématiques du CNRS ne représentent qu'une partie de la totalité des chercheurs académiques (320 sur les 1800 que comportent le CNRS et l'Université), le CNRS présente l'avantage d'avoir un suivi centralisé des contrats par départements scientifiques et de rendre compte également des contrats entre industriels et laboratoires d'université à travers les unités de recherche associées au CNRS.

##### 3.3.1.1. Les Missions du CNRS (décret du 24 novembre 1982)

\* Évaluer, effectuer ou faire effectuer toutes recherches présentant un intérêt pour l'avancement de la science, ainsi que pour le progrès économique social et culturel du pays.

\* Contribuer à l'application et à la valorisation des résultats de ces recherches.

\* Développer l'information scientifique en favorisant l'usage de la langue française.

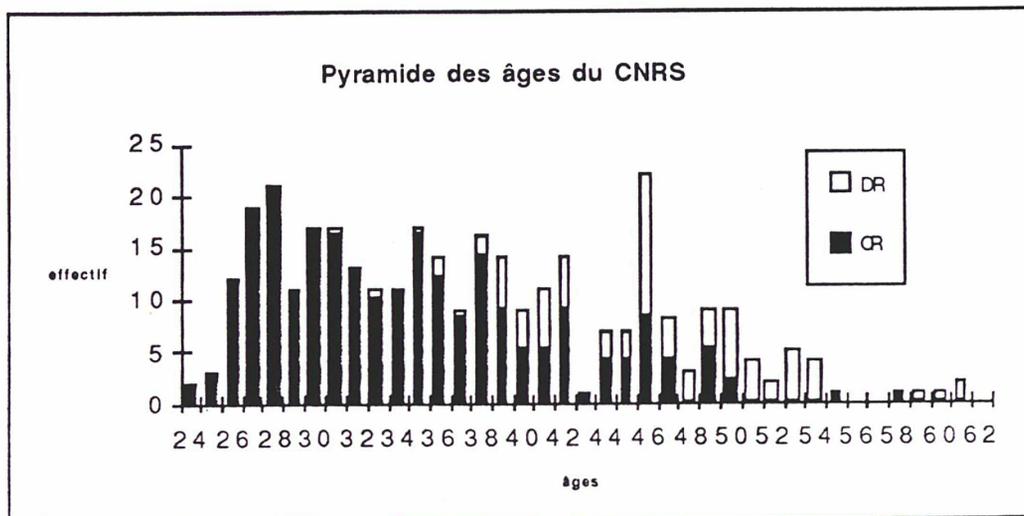
\* Apporter son concours à la formation à la recherche et par la recherche.

\* Participer à l'analyse de la conjoncture scientifique nationale et internationale et à ses perspectives.

##### 3.3.1.2. Les ressources humaines

###### *Effectifs*

Le CNRS compte environ 320 mathématiciens, répartis en 75% de chargés de recherche (CR), et 25% de directeurs de recherche (DR):



En termes de rémunérations, les jeunes chercheurs embauchés comme chargés de recherche de deuxième classe sont recrutés à environ 120 KF nets par an. Leurs perspectives d'évolution de carrière sont relativement limitées, étant donné le faible nombre de postes de directeurs de recherche et la baisse depuis le milieu des années 80 du nombre de postes de professeurs à l'université (crise conjoncturelle qui devrait mécaniquement se résorber vers les années 2005 avec le départ à la retraite d'un nombre important de professeurs). En effet, les postes de recherche en mathématiques au CNRS étaient traditionnellement considérés comme des postes de transition pour jeunes chercheurs en attente d'un poste de professeur à l'Université, ce qui explique ce nombre structurellement faible de postes de directeurs de recherche et l'engorgement actuel du CNRS depuis le basculement du milieu des années 80 ( l'effectif du CNRS en Mathématiques a été multiplié par deux en 10 ans ).

### *Environnement matériel professionnel*

Prenons l'exemple d'un laboratoire de mathématiques du CNRS associé à l'Université (appelé URA : unité de recherche associée) de 60 personnes. Son budget de fonctionnement est de l'ordre de 2 à 3 MF répartis en 200 KF financés par le CNRS, entre 800 KF et 1 MF par le ministère de la recherche, le reste du financement provenant de contrats divers : collectivités locales, Europe (contrats "Esprit" et leurs frères), et quelques contrats industriels. Une grande partie du budget de fonctionnement est consacré à la documentation et à la bibliothèque. A titre de comparaison, examinons le budget (salaires inclus) d'un laboratoire de recherches américain de mathématiques

#### SALAIRES

5 chercheurs à une moyenne de 45 K\$ par an	K\$ 225
2 assistants à temps plein à 30 K\$ par an	K\$ 60
1 post-doctorant	K\$ 25

#### AVANTAGES SOCIAUX

K\$ 46

#### ETUDIANTS EN THESE

8 étudiants en thèse	K\$ 96
----------------------	--------

#### COUTS DE RECHERCHE ASSOCIES 5x7 K\$

K\$ 35

(secrétariat, reprographie, imprimerie, voyages, coûts de matériel informatique exclus)

#### COUTS INDIRECTS

K\$ 181

#### TOTAL PAR AN

K\$ 668 (3.4 MF)

#### COUTS DE MATERIEL INFORMATIQUE

un réseau X.25 avec disque de 500 Mo	K\$ 50 à	K\$ 100
trois stations hautes performances, 4 Mo,		
écran couleur haute résolution (40 à 80 K\$)	K\$ 120 à	K\$ 240
six stations bas de gamme, 3 Mo, écran bitmap noir et blanc		
(15 à 20 K\$)	K\$ 90 à	K\$ 120
licences de logiciels (compilateurs C et Fortran) :	de 1 à 3 K\$,	
jusqu'à 25 K\$ chacune.		

Les coûts de matériel informatique sont donc un poste important (250 à 300 K\$), sachant que les coûts de maintenance représentent 15 à 20 % du total. Ces dépenses de fonctionnement incompressibles laissent peu de marge

de manœuvre pour les frais de déplacement. En moyenne, le budget consacré aux voyages dans un laboratoire Français est de l'ordre de 2000 à 3000 F par personne et par an. Au laboratoire d'informatique de l'Ecole Polytechnique, ce budget a été divisé par 5 ces dernières années. Il s'élève en effet à 36 KF pour 40 personnes, soit 900 F par personne et par an !

Au cours de nos entretiens, nous avons rencontré des chercheurs qui travaillent sur des sujets susceptibles d'intéresser les industriels, comme la visualisation de données numériques et le traitement d'images. Cependant, peu d'entre eux essaient de collaborer avec les entreprises, certains rétorquant le fait que les machines sur lesquelles ils travaillent ne leur appartiennent pas et qu'ils n'ont déjà pas assez de temps pour travailler sur les sujets qui les intéressent.

### 3.3.1.3. Les Contrats

Conséquence de ce train de vie relativement modeste et du fait que les laboratoires académiques ne gèrent pas les salaires, les chercheurs en mathématiques "ne connaissent pas leur valeur" (sic) nous ont dit des responsables des mathématiques au CNRS. La moyenne des contrats au CNRS est de l'ordre de 100 KF, soit l'équivalent en coût de moins de deux mois de travail de chercheur. En effet, les chercheurs académiques tarifient leurs services aux industriels au coût marginal; sans tenir compte des amortissements des machines et d'une part significative des heures de travail consacrées aux recherches correspondantes (la règle que la direction voudrait voir appliquée dans les laboratoires est qu'environ 50% des heures de travail soient facturées aux industriels, sachant qu'un directeur de recherche correspond à un coût de 1 MF par an). Même des contrats de moins de 100 KF sont acceptés par des chercheurs, trop contents avec cette somme de pouvoir s'acheter l'imprimante dont ils avaient besoin depuis des mois ou compléter leur budget voyages.

Le budget hors salaires des laboratoires universitaires associés au CNRS se répartit comme suit :

(1800 chercheurs, dont 320 payés par le CNRS)	
Contribution du CNRS	14 MF
Contribution du Ministère de la recherche	90 MF
	6.1 MF Contrats Européens
11.3 MF Contrats	{ 5.2 MF Contrats Industriels { 2.5 MF entreprises publiques
	{ 2.7 MF entreprises privées

soit environ 115 MF par an au total. Les contrats industriels représentent donc moins de 5% du budget (10% tournés vers les PME-PMI), à comparer aux 20% de contrats industriels dans le budget salaires inclus de l'INRIA, et presque 50% au laboratoire de géostatistiques de l'Ecole des Mines.

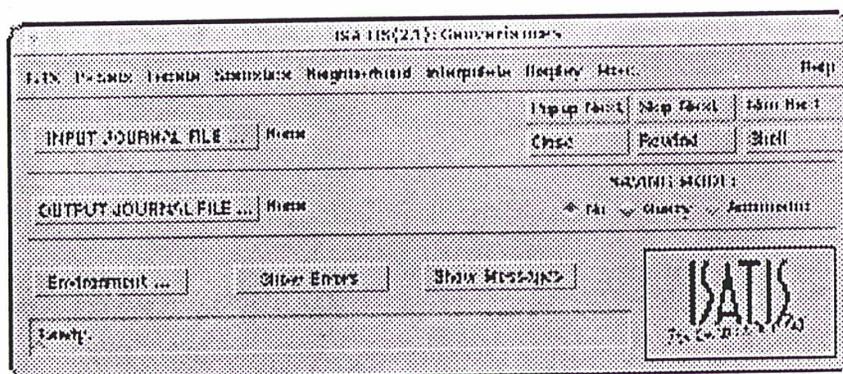
Malgré une volonté affichée par la direction du CNRS de valoriser la recherche fondamentale en se tournant vers l'industrie, les contrats industriels et les contrats Européens sont en baisse depuis 1992, ce qui n'a fait qu'aggraver les difficultés budgétaires de l'organisme, qui dans son système comptable des années 80 globalisait toutes les ressources budgétaires, permettant en régime de croisière une plus grande souplesse, les laboratoires

se faisant avancer l'argent des contrats par le CNRS afin de commencer les travaux dès la signature du contrat.

### 3.3.1.4. Concurrence avec les autres laboratoires

Cette politique de tarification a pour conséquence que le CNRS fausse le jeu de la concurrence avec les organismes de recherche ou les PME qui vendent leurs services au coût réel. Pour les petites entreprises créées à partir d'idées mathématiques originales comme ArtSciMed et Neuristic, le seul moyen de survivre est de se focaliser sur les marchés étrangers. Ainsi, ArtSciMed réalise 90% de son chiffre d'affaires à l'export, essentiellement dans le domaine du traitement d'images.

Un autre exemple mérite d'être mentionné dans le domaine de la géostatistique : un laboratoire de Stanford a développé un logiciel "freeware" de géostatistiques. De l'autre côté de l'atlantique, le centre de géostatistiques de l'Ecole des mines a conçu et commercialise son logiciel ISATIS, qu'elle facture 80 KF l'unité aux entreprises. Actuellement, plus de 250 licences ont été vendues. Cette réussite s'explique simplement par le fait que ce laboratoire de géostatistiques répond exactement aux besoins de ses clients, en offrant à la fois des services de maintenance et de formation aux ingénieurs.



*Logiciel de géostatistiques ISATIS*

### 3.3.1.5. Politique d'évaluation et d'orientation de la recherche

L'orientation des recherches au CNRS passe essentiellement par le recrutement. Sur les 12 chercheurs recrutés en Mathématiques en 1995, 4 l'ont été sur des critères thématiques tels que l'analyse numérique et modélisation. L'évaluation de la recherche est assurée par le Comité National de la Recherche Scientifique, composé de chercheurs renommés et habilitée à évaluer d'autres structures. Au niveau individuel, le critère d'évaluation principal reste la qualité et le nombre de publications; les chercheurs recherchent avant tout la reconnaissance de leurs pairs. Au niveau des laboratoires sont examinés les publications et les contacts industriels des équipes, poussées de plus en plus à rechercher des contrats. Le directeur général du CNRS écrit à ce propos dans le rapport d'activité de 1994 : "étant donnée la marge de manoeuvre budgétaire dont dispose l'organisme, on peut se demander si le CNRS conserve une réelle capacité stratégique". Cependant, il est possible de rebondir sur ce constat en se rappelant que la mission première du CNRS est la recherche fondamentale, et que parfois l'émergence d'idées nouvelles nécessite une totale liberté des chercheurs.

### 3.3.2. Le modèle Fraunhofer

Autre modèle de gestion de la recherche en mathématiques, le modèle des instituts Fraunhofer repose sur un financement en trois tiers (salaires inclus) :

- 1°) 1/3 en provenance de l'Etat,
- 2°) 1/3 des Rentiers : contrats Européens ("Esprit" et ses frères), monopoles publics,
- 3°) 1/3 de contrats industriels.

Ce modèle correspond assez bien à celui des centres de recherche de l'Ecole des Mines de Paris, le financement par l'industrie pouvant aller jusqu'à presque 50% dans certains laboratoires comme le centre de géostatistiques.

La recherche orientée effectuée dans les laboratoires de l'Ecole des Mines est un va-et-vient permanent entre des problèmes industriels et des recherches fondamentales. À partir de problèmes posés par des acteurs économiques, dont la solution ne relève pas d'approches banales, le laboratoire développe de nouveaux modèles et de nouvelles méthodes ou teste de nouvelles substances ou procédés. Il doit ensuite valider la pertinence des développements réalisés pour le partenaire et transférer la technologie créée chez celui-ci. Cette orientation de la recherche transparaît sur l'activité des laboratoires, dont l'organisation ne correspond pas aux domaines scientifiques académiques, mais aux applications industrielles. Au centre de géostatistiques, le domaine traditionnelle de la mine (estimation et modélisation de gisements) reste une composante forte de l'activité de recherche. Toutefois, en utilisant le caractère unifié de la méthodologie utilisée, les champs d'applications se sont élargis considérablement et interagissent fortement avec l'organisation du laboratoire : en environnement, le centre se fait peu à peu reconnaître en matière de pollution des eaux et des sols, ainsi qu'en génie civil et en météorologie ; en halieutique (pêche), la géostatistique est officiellement préconisée par les professionnels ; la santé présente un nouveau domaine d'intérêt où la géostatistique permet de quantifier une nuisance sonore ; permettant d'estimer le risque associé à un projet minier, la géostatistique investit le domaine de la finance, bien loin de ses préoccupations initiales ! Le groupe informatique enfin, a pour tâche décisive de parachever et de promouvoir des logiciels qui puissent mettre en valeur la recherche effectuée au Centre, et rendre la Géostatistique accessible aux utilisateurs industriels.

Ce centre de recherche, comme tous les autres laboratoires de l'Ecole des Mines, est géré comme une PME autonome dont le directeur qui négocie et gère librement les contrats de recherches, est responsable de la mise en oeuvre du budget qui lui est alloué et propose une stratégie scientifique à la direction. La direction de l'École contrôle les recrutements et les promotions, distribue les ressources budgétaires allouées par la tutelle, définit une stratégie scientifique globale, mais intervient peu dans la vie quotidienne des centres. La gestion des contrats de recherche est confiée à Armines, association qui gère plus de 200 MF de contrats. Le budget du centre de géostatistiques est de 8.5 MF (salaires inclus), et comporte 17 permanents, ce qui représente 500 KF de contrats par chercheur; il se décompose suivant

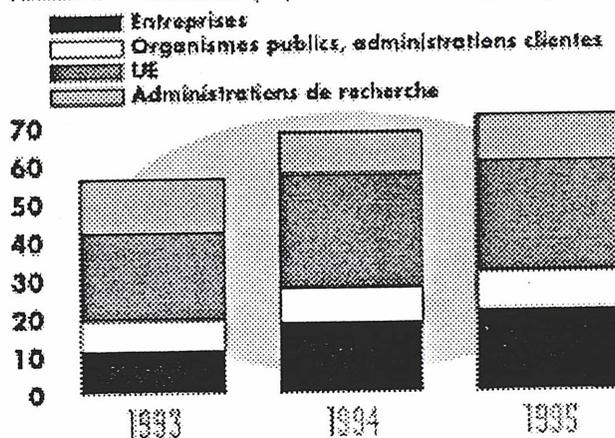
- 42% de contrats auprès d'entreprises pétrolières,
- 12% de contrats auprès d'entreprises minières,
- 12% de redevance logiciel,
- 22% de contrats européens et de contrats du ministère de la recherche,
- 12% d'enseignement.

Le transfert des technologies développées à l'École des Mines de Paris s'effectue non seulement par la réalisation de recherches contractuelles, mais aussi par la création d'entreprises. Tous domaines confondus, les entreprises à la création desquelles sont associés d'anciens chercheurs des laboratoires de l'école emploient aujourd'hui plus de 250 personnes et réalisent plus de 200 MF de chiffre d'affaires cumulé. Une des plus connues dans le domaine des mathématiques est Morphosystèmes, spécialisée dans la reconnaissance de caractères et d'empreintes digitales à partir de techniques reposant sur les réseaux de neurones.

### 3.3.3. Le modèle INRIA

Enfin, le modèle INRIA, qui est aussi le modèle adopté à Stanford et au MIT, consiste à limiter à 20% la part des contrats industriels dans le budget (salaires inclus) de l'organisme. Contrairement à l'idée communément répandue selon laquelle les universités américaines sont massivement financées par des contrats avec des entreprises privées, le financement de ces laboratoires ne représente en moyenne que 8.5% de leurs ressources (12.5% au MIT). De même, le financement de Stanford n'est assuré qu'à hauteur de 25% par les frais de scolarité. Les contrats industriels ne pèsent que 15% du budget, le reste du financement correspondant plus ou moins directement à des contrats d'Etat (souvent à travers les contrats du Department of Defense).

Montant des ressources propres contractuelles (en MF)



Ce mode de financement permet à l'INRIA de concilier les deux objectifs que sont l'excellence scientifique et la pertinence économique.

### Les Missions

Organisme de recherche dont le statut d'EPST et les missions sont définis dans le décret numéro 85-831 du 2 août 1985, l'INRIA a vocation à contribuer à la recherche fondamentale et appliquée en informatique, automatique et calcul scientifique, et au développement du secteur des technologies de l'information et des secteurs applicatifs correspondants. En particulier, l'institut identifie les grands problèmes de ces secteurs, met en oeuvre, dans ses projets, des recherches répondant à leurs besoins futurs et développe un partenariat avec les industriels. Il entretient, à cet effet, une collaboration avec le reste de la communauté scientifique française et internationale, et contribue à la formation par la recherche. L'établissement a vocation à

concentrer ses activités sur des projets de recherche ayant des objectifs finalisés et clairement identifiés.

La position de l'INRIA au sein de la communauté scientifique nationale repose sur des liens approfondis avec les laboratoires du CNRS, et certains centres de recherche de l'Ecole des Mines (dont le centre de mathématiques appliquées, d'autres organismes de recherche et des universités, sur la base de relations équilibrées entre institutions). Ces accords de partenariat doivent permettre, d'une part, d'approfondir les connaissances fondamentales pour le bon déroulement des recherches, d'autre part, de catalyser les efforts de la communauté scientifique sur les projets de recherche répondant aux besoins de la société et des entreprises. Dans la mise en oeuvre de ces partenariats, l'INRIA apporte ses compétences et s'implique, plus particulièrement, dans les aspects applicatifs des recherches correspondantes.

Le transfert des résultats de la recherche est l'une des principales missions confiées à l'INRIA, en parallèle de son activité de recherche fondamentale et appliquée en informatique et automatique. L'INRIA a encouragé la création de sociétés de haute technologie qui restent proches de la recherche et dont le personnel est, en grande partie, constitué d'anciens chercheurs. Qu'elles soient filiales de l'institut ou sociétés dont le capital en est indépendant, ces entreprises ont pour principale stratégie le transfert, l'industrialisation et la commercialisation de savoir-faire ou de prototypes issus de l'INRIA.

Le statut d'EPST autorise l'INRIA à prendre des parts du capital de sociétés privées. C'est dans ce cadre que l'institut est à l'origine de la création de trois filiales : Simulog, Ilog et O2 Technology. D'autre part, des chercheurs, ingénieurs de recherche et anciens boursiers de l'INRIA ont été à l'initiative de la création de 17 sociétés. En contrepartie de leur financement, elles apportent à l'INRIA des informations de caractère industriel et technologique de très haut niveau lui permettant ainsi de mieux orienter ses futures recherches.

*Les filiales de l'INRIA :*

Ilog  
O2 Technology  
Simulog

*Les sociétés de technologie de l'INRIA :*

Aleph Technologies  
Chorus Systems  
Cogenit  
Cose  
Dolphin Integration  
Edelweb  
Ergomatic Consultants  
EUnet France  
Euroclid  
Grif  
Istar  
Lorin  
Noesis  
Robosoft  
Soft Moutain  
Timeat  
Verilog

## Sélection et évaluation des projets de recherche

Il arrive que des thèmes de recherche soient suggérés par les pouvoirs publics, comme l'étude du génome dans le cadre du contrat de plan avec l'Etat. D'autres collaborations sont engagées dans le domaine des Télécoms entre le CNET et l'Unité de Recherche de Sophia-Antipolis qui mène une politique volontariste en ce sens (25 à 30% des recherches contractuelles de l'INRIA viennent des thèmes réseaux).

Les projets de recherche (jusqu'à 25 à 30 chercheurs, dont 5 à 6 permanents) sont regroupés en programmes (qui comprennent jusqu'à 10 projets). La sélection des projets de recherche s'effectue selon les quatre phases suivantes

### Première phase :

Pendant deux jours se réunit un conclave, composé d'un panel d'experts, devant lesquels les gens exposent leurs travaux. Ce panel est choisi parmi des universitaires français et étrangers, et des industriels français. . A l'occasion de ce conclave, l'aspirant chef de projet doit montrer

1. qu'il existe une réelle innovation scientifique,
2. qu'il existe en aval une demande économique (clients potentiels),
3. comment il se situe dans le contexte international (qui travaille sur le sujet ?),
4. Quel lien existe avec le système d'enseignement Français.

A chaque expert est assigné un à deux projets, sur lesquels ils rédigent un rapport d'évaluation.

### Deuxième phase :

Ce rapport est transmis à l'INRIA qui le diffuse aux directeurs de projets correspondants. Ces directeurs de projets rédigent alors une réponse au niveau de chaque unité de recherche. (discussion en comité de projets)

### Troisième Phase :

Les réponses sont transmises au comité d'évaluation qui élabore des propositions (arrêter le projet, le fusionner avec un autre, ...)

### Quatrième Phase :

Les rapports d'experts et les réponses sont présentées au conseil scientifique de l'INRIA, composé de personnes extérieures à l'organisme : scientifiques, industriels (responsables de la recherche chez BULL), membres de l'administrations de tutelle, nommés par décret sur proposition de l'INRIA.

La tendance actuelle à l'INRIA est à l'allégement du processus de création de projets. La durée maximale d'un projet est de 12 ans. Le projet peut être prorogé à condition d'effectuer à nouveau la procédure de sélection précédemment décrite.

L'INRIA a par ailleurs introduit en France le post-doc industriel, pratiqué depuis un certain nombre d'années dans l'université du Minnesota, qui consiste à recruter un docteur pour industrialiser ses recherches.

Cette nouvelle catégorie de bourses, créée par la direction des relations industrielles, est destinée à de jeunes docteurs, sélectionnés par un comité ad hoc et appelés à travailler sur des sujets de recherche communs à l'INRIA et à des entreprises (sociétés de technologie de l'INRIA en particulier). L'objectif principal de ces bourses dont la durée est d'un an est :

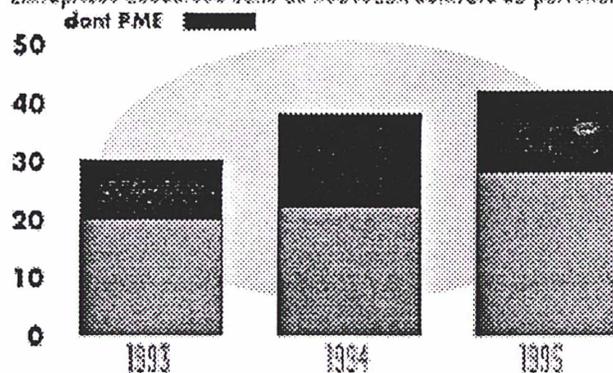
- \* d'une part, augmenter les relations contractuelles projet-entreprise ;
- \* d'autre part, accélérer le transfert des résultats de recherches menées à l'INRIA vers les PME-PMI.

Un contrat entre l'industriel et l'INRIA doit être conclu dès le choix du candidat. Le post-doc industriel est salarié de l'INRIA et peut être mis à disposition au sein de l'entreprise. Il est prévu un financement de 10 bourses par an. Le salaire brut est de 13 193 F par mois, sachant que l'intéressé peut recevoir un complément de salaire de la part de l'industriel avec l'autorisation de l'INRIA.

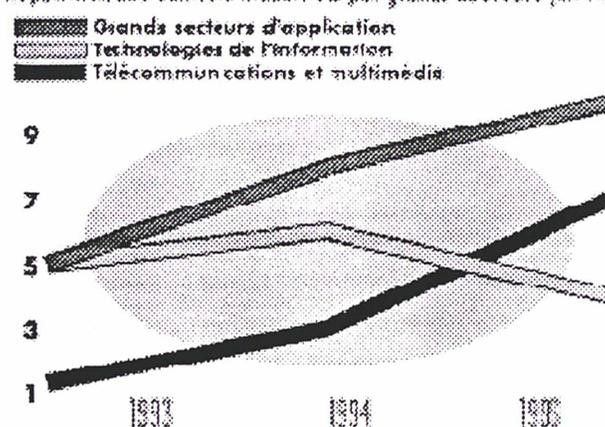
### Les contrats

Les ressources propres de l'INRIA sont passées entre 1993 et 1995 de 57 à 73 millions de francs. Les contrats avec les entreprises ont subi la plus forte augmentation. À 11 millions de francs en 93, ces ressources contractuelles étaient de 17,7 millions en 94, pour atteindre 20,6 millions de francs en 95. Le montant issu de contrats avec des organismes publics et des administrations clientes ou avec l'Union européenne a aussi crû sensiblement. Cette évolution est liée à celle des contrats et partenariats. Trente entreprises (dont 10 PME) étaient impliquées dans de nouveaux partenariats en 93 contre 42 (dont 14 PME) en 95. C'est le cas par exemple, pour l'année dernière, de Nomaï, Lyonnaise Communications, Daimler Benz, OST ou Verilog...

Entreprises associées dans de nouveaux contrats ou partenariats



Répartition des contrats industriels par grands secteurs (en MF)



Pourquoi les entreprises font-elles plus facilement appel à l'INRIA et à ses startups et comment arrivent-elles à facturer leurs services à un juste coût (en général 50% du coût analytique des recherches) ? Tout simplement par qu'elles raisonnent comme les industriels en termes de coûts et délais.

### 3.4.4. Le Laboratoire Central de Recherches de Thomson (LCR)

Nous avons par ailleurs observé au LCR de Thomson des procédures de sélection et d'évaluation des projets de recherche très similaires à celles de l'INRIA. A la différence de l'Aérospatiale, Thomson n'a pas de conseil scientifique, mais un "collège scientifique" d'un peu plus de 300 membres, choisis pour leur notoriété scientifique. Sont aussi membres de droit les directeurs techniques et les cadres de haut niveau de la société. La mission de ce collège scientifique est d'avoir une vision des enjeux de la recherche dans les 5 à 10 ans à venir comme le traitement d'images, la fusion de données ...

L'évaluation des chercheurs du LCR de Thomson repose sur les quatre critères suivants :

- faire émerger les problèmes de recherche des unités opérationnelles de Thomson (40000 personnes),
- trouver les financements associés auprès de la DRET, de la CEE (contrats ESPRIT, EUCLIDE, ...), des unités de Thomson ou du Ministère de la recherche,
  - effectuer la recherche correspondante,
  - Diffuser les résultats en interne et à la communauté scientifique internationale, si toutefois aucun veto n'est prononcé par le comité qui gère les problèmes de confidentialité, composé du chef de laboratoire, du chef du groupe, du directeur du LCR, du directeur de la stratégie, et de l'ingénieur brevet.

## 3.5. Quelles politiques d'orientation de la Recherche

### 3.5.1. La position du ministère de la recherche

Les personnes que nous avons rencontrées au ministère considèrent que le CNRS est géré de manière trop rigide et souhaiterait une politique plus volontariste d'orientation des thèmes de recherche. Au niveau individuel, les chercheurs sont évalués sur la qualité et la quantité de leurs publications, à travers la structure du Comité National de la Recherche Scientifique. Les contacts avec le monde industriel ne sont pris en compte que dans l'évaluation des équipes de recherche. Nos interlocuteurs ont insisté sur la nécessité d'un retour socio-économique de la recherche au titre de la vocation de service publique de cet organisme, ce qui n'implique pas nécessairement la production de brevets, mais une contribution à la compétitivité du pays proportionnelle aux investissements publics engagés. Du fait de la compression du budget des organismes publics de recherche, les laboratoires s'engagent de plus en plus dans des contrats industriels, mais sans coordination sans en informer toujours la hiérarchie, et sans tarifier leurs services à un juste coût, qui n'entrave pas les mécanismes de marché.

La recherche universitaire est jugée totalement hors de contrôle. Ce n'est pas la qualité des recherches qui est contestée, mais le choix des thèmes de recherche. L'évaluation de la recherche académique devrait prendre en compte :

- La qualité des publications.
- L'enseignement
- Les contrats industriels
- La vulgarisations

quatre critères pertinents, dont seul le premier est pris en compte dans le système actuel. Certains domaines de recherche exploratoire, comme la physique des particules, mobilisent des sommes d'argent considérables. La contribution du ministère de la recherche au budget de fonctionnement du

CERN est de 800 MF par an, sans compter les équipes qui travaillent à Genève. Cependant, ces recherches ont un effet d'entraînement sur l'enseignement de la physique, ainsi que sur la connaissance des gens grâce à des campagnes de vulgarisations efficacement menées.

Quels sont alors les moyens d'influer sur l'orientation des recherches académiques ? Le chercheur maximise dans l'ordre d'importance décroissant

- 1) son plaisir personnel
- 2) sa carrière
- 3) la recherche sur les thèmes proposés par les Laboratoires ou organismes.

Le rôle du politique est alors de faire rétroagir le système de 3) vers 1) par l'intermédiaire des effets de mode, en utilisant la valorisation sociale des chercheurs par les sujets sur lesquels il travaille. En effet, un chercheur qui travaille sur la théorie des nombres sera moins bien considéré qu'un chercheur qui étudie les mécanismes de codage des protéines dans l'ADN. Un des moyens d'agir pour le ministère est l'utilisation des effets de mode de la recherche. Le dogme selon lequel les chercheurs du CNRS s'autorisent à ne faire des recherches que sur les domaines qui les intéressent parce qu'ils sont moins bien payés que dans l'industrie est jugé inacceptable par le ministère.

“la science, fût-elle fondamentale, doit servir la société” (sic).

Toutefois émerge actuellement toute une catégorie de chercheurs qui ne trouvent plus indigne de travailler pour l'industrie. L'époque pendant laquelle on considérait que “la science ne devait pas être le repaire de l'argent” est révolue. Cependant, ce discours implique que soient mises en place des règles claires sur les manières de se comporter avec les industriels. Le politique doit faire en sorte que certaines dérives ne se produisent pas (dumping, contrats non connus par les laboratoires, associations destinées à faciliter l'écoulement d'argent). Le ministère de la recherche est en train de réfléchir à une réforme de la réglementation dans ce domaine. Il s'agit principalement d'un problème de statuts : le chercheur, en tant que fonctionnaire, est soumis à

- \* la règle de cumul des rémunérations (inférieures à +100% du salaire brut),
- \* la règle de cumul des fonctions : un fonctionnaire est sensé travailler 100% de son temps pour l'Etat et doit pouvoir justifier le fait que ses activités complémentaires ne perturbent pas son travail,
- \* des règlements empêchant les prises d'intérêts dans des entreprises.

Aux USA, la réglementation est plus souple : les chercheurs universitaires qui ont des activités mixtes sont auditionnés et déclarent la manière dont ils répartissent leur activité et leurs étudiants. En France, les règles sont trop rigides. L'assouplissement envisagé par le ministère concerne les activités de consulting et consisterait à conserver la règle du cumul en autorisant des revenus dé plafonnés pour les royalties perçues sur les brevets.

### 3.5.2. La veille technologique

Des politiques d'orientation et d'évaluation de la recherche comme celles décrites dans le modèle précédent permettent d'éviter des erreurs comme celle d'un responsable de centre de recherche d'une grande entreprise française, qui un jour s'est emparé du mot “contrôle flou” pour réunir son conseil scientifique et organiser un grand colloque afin de savoir si cette

technique pouvait être utile à sa société, démarche qui s'est avérée peu fructueuse.

Par ailleurs, on peut s'interroger sur l'influence des effets de mode comme la logique floue ou les réseaux de neurones dans les centres de recherche industriels. En fait, le succès de ces techniques s'explique par le peu de temps nécessaire pour les assimiler. Ainsi, il y a quelques années le seul mot "intelligence artificielle" permettait aux laboratoires d'avoir des années de contrats avec l'industrie, tendance qui s'est actuellement retournée au profit de la "fusion de données", utilisée notamment dans le domaine du traitement d'image; en fait, ce terme ne désigne en général que des techniques bien connues depuis des années 60 de filtrage de Kalman ou des méthodes des moindres carrés.

#### 4. Conclusion

Il faut donc se méfier de l'utilitarisme. L'INRIA semble être un bon compromis entre les deux modèles extrêmes que sont les modèles Fraunhofer et CNRS. Cependant, chaque modèle a sa propre fonction, qui conditionne l'existence des autres modèles. En effet, le modèle Fraunhofer permet la diffusion en masse de techniques mathématiques dans l'industrie. La réussite d'Armines en est la meilleure preuve. Quant au CNRS, il ne faut pas oublier qu'il est un maillon essentiel du rayonnement international de l'Ecole Française de Mathématiques, et qu'il nous est envié partout dans le monde.

Ce rayonnement atteint peu le grand public, plus sensible à la recherche médicale, qui suscite la compassion, ou l'astronomie et la physique des particules, qui évoquent l'origine du monde. Il suffit d'ouvrir une revue de vulgarisation scientifique sérieuse comme "Pour la Science" ou "La Recherche". On y trouvera les moindres détails des dernières expériences dans le domaine de la biologie, des dernières observations cosmiques. Les mathématiques sont en général réduites à une simple rubrique de récréations ou à des articles de psychologie sur l'anxiété face aux maths.

Les mathématiques n'apparaissent-elles pas rébarbatives parce que les mathématiciens sont trop sérieux et n'essaient pas de s'attirer la sympathie du grand public ? Même si certains réalisent des films mathématiques (Comme Thurston, qui a fait un film sur l'inversion de la sphère), ou produisent des images qui suscitent le rêve.

Face à une réduction des financements publics de la recherche en mathématiques, par rapport à laquelle les trois modèles décrits précédemment peuvent paraître plus ou moins bien armés, il y a deux moyens de se défendre : être utile, ou être populaire.

# ANNEXE I

Le CNRS

<http://www.cnrs.fr>

## COMITE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

### EVALUATION ET ANALYSE DE LA CONJONCTURE

#### ■ Evaluation :

- l'évaluation de la qualité de la recherche dans une discipline ne peut se faire que par des scientifiques de la même spécialité
- le Comité national de la recherche scientifique joue ce rôle au CNRS
- il se réunit deux fois par an pour évaluer les chercheurs et leurs laboratoires et faire des propositions de recrutement et de promotion de chercheurs

#### ■ Analyse de la conjoncture :

- le Comité national analyse régulièrement la conjoncture scientifique et ses perspectives dans un contexte national et international



## LABORATOIRES DE RECHERCHE

### LE TISSU VIVANT DU CNRS

L'activité du CNRS repose sur des unités de recherche qui sont des laboratoires de taille variable et aux structures diversifiées dont :

- 182 unités propres : le CNRS y est responsable de la politique scientifique et de l'administration
- 830 unités associées : le CNRS assure le pilotage scientifique et apporte des moyens à des laboratoires administrés par des partenaires (en majorité des universités)
- 126 unités mixtes : pilotage scientifique et coresponsabilité administrative du CNRS avec un partenaire (entreprise, organisme, université ...)
- 230 groupements de recherche : laboratoires "sans murs", regroupant sur des thèmes scientifiques des équipes de plusieurs laboratoires

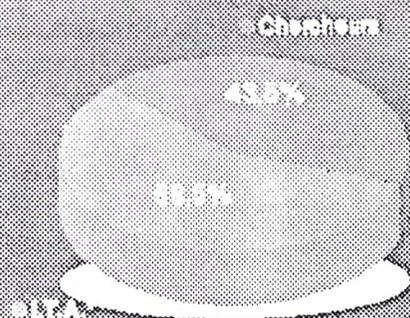


1987

# EFFECTIFS : 26 000 PERSONNES

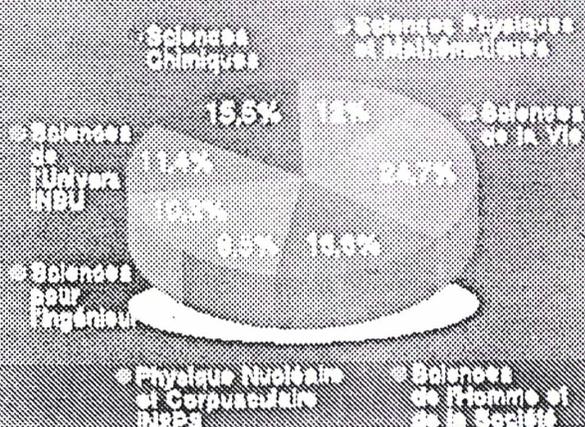
1994

## Par catégories



I.T.A. : Ingénieurs, Techniciens, Administratifs : personnel appelé à la recherche

## Par départements



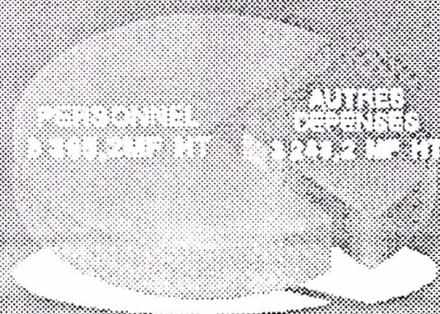
Source : SP

CEA

# BUDGET : 11,6 MILLIARDS DE FRANCS HT

1994

## Structure des dépenses



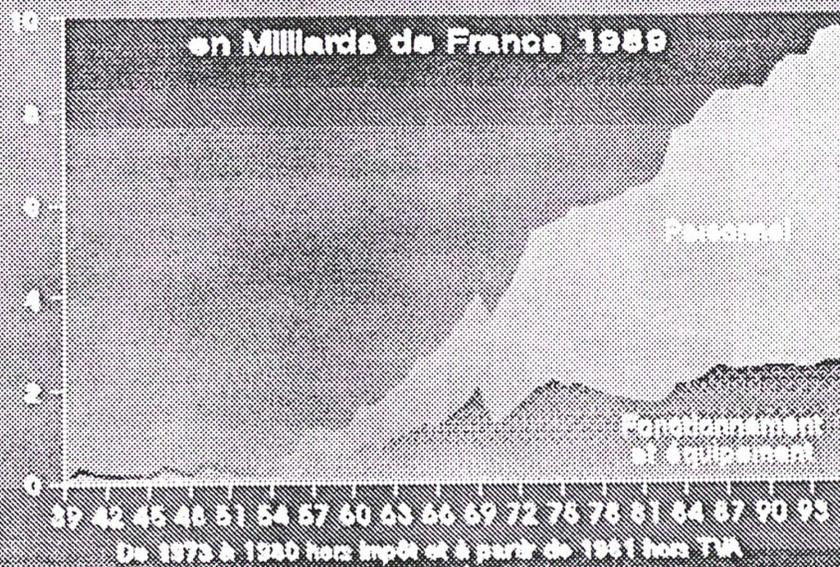
- Moyens des Laboratoires 2 123,0 MF HT
- Grands Instruments Scientifiques 542,8 MF HT
- Opérations Immobilières 95,6 MF HT
- Moyens Communs 466,1 MF HT
- Réserve 32,0 MF HT

Source : SC/RS/CO

CEA

# BUDGET : EVOLUTION

1930-1994



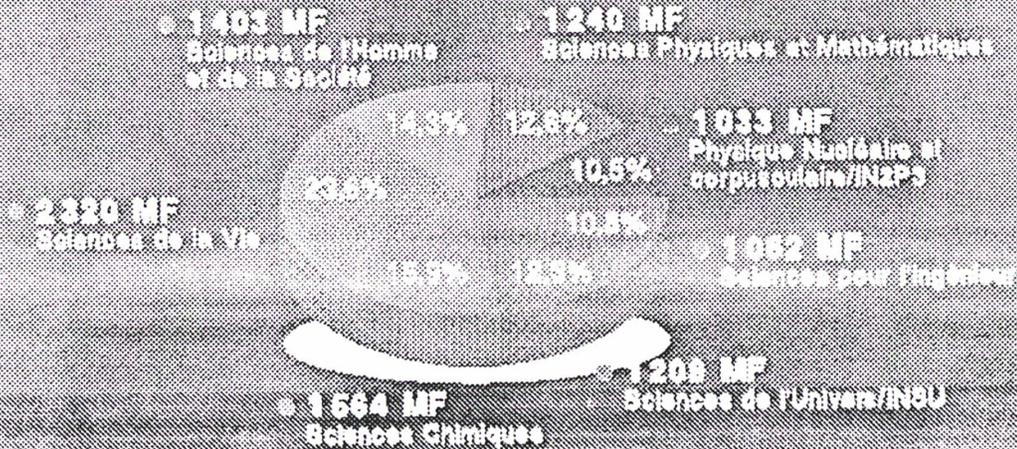
Source : DGFIC/DB

CS  
RS

# BUDGET DES DEPARTEMENTS SCIENTIFIQUES\*

1994

Trois programmes interdisciplinaires de recherche, hors opérations immobilières et moyens de calcul scientifique CNRS, y compris ressources propres des laboratoires



Source : BR/SC29

Source : BR

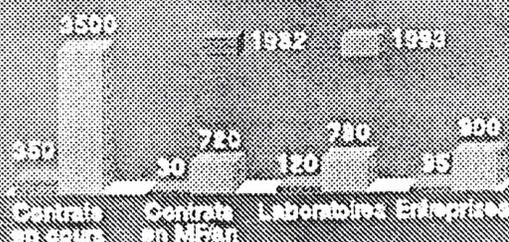
CS  
RS

# CNRS ET ENTREPRISES

## DES PARTENAIRES PRIVILEGES

Le CNRS a multiplié par 10 ses collaborations industrielles au cours des 10 dernières années, en développant la recherche à objectifs partagés avec les entreprises. Dialogue et concertation : rendez-vous du CRIN (Association ECRIN 5000 participants)

■ Evolution des contrats de collaboration



■ 15 Groupements de recherche avec 70 entreprises

• Une thématique définie en commun pour une durée moyenne de 4 ans

■ 15 unités mixtes

• Co-responsabilité CNRS-entreprises

• Dotées de moyens équivalents par les 2 parties

■ Des échanges par les hommes

• Formation par la recherche, 1000 jeunes docteurs engagés chaque année par des entreprises

• Plus de 380 heures de doctorants/post-doctorales, cofinancées avec les entreprises

• Mise à disposition/détachement ou mise en disponibilité

• Statut de consultant (550 accords)



# HISTOIRE

## CREATION DU CNRS EN 1939

sous l'impulsion de Jean Perrin (prix Nobel de Physique 1926), signature du décret loi du 19 octobre 1939 par Albert Lebrun, Président de la République

■ Quatre étapes principales

**1939-1960** • Le CNRS est essentiellement composé de laboratoires propres

**1960-1980** • Une politique d'association très active avec les universités, grandes écoles et autres organismes de recherche

**1980-1990** • Ouverture sur le monde de l'entreprise, création de programmes interdisciplinaires et de laboratoires mixtes

**1990-1994** • Plan de modernisation et premiers schémas stratégiques



## LES MISSIONS DU CNRS

- Evaluer, affectuer ou faire effectuer toutes recherches présentant un intérêt pour l'avancement de la science, ainsi que pour le progrès économique, social et culturel du pays
- Contribuer à l'application et à la valorisation des résultats de ces recherches
- Développer l'information scientifique en favorisant l'usage de la langue française
- Apporter son concours à la formation à la recherche et par la recherche
- Participer à l'analyse de la conjoncture scientifique nationale et internationale, et à ses perspectives

(décret du 24 novembre 1982)



## LE SCHEMA STRATEGIQUE 1993-1995

### OBJECTIFS

- Organiser la recherche fondamentale en fonction des grandes orientations de la science, et en anticipant les attentes de la société
- Assurer la cohérence et la cohésion des programmes
- Etre un outil de dialogue pour tous les partenaires de la recherche



# LE SCHEMA STRATEGIQUE 1993-1995

## LES 4 IDEES FORCE

- 1 ■ Rassembler les compétences pluridisciplinaires autour des enjeux majeurs de la science et de la société
- 2 ■ Renforcer tous les partenariats
- 3 ■ Renouveler la gestion des ressources humaines
- 4 ■ Déconcentrer, décentraliser, diversifier les modes de gestion



## **ANNEXE II**

### **Statistiques**

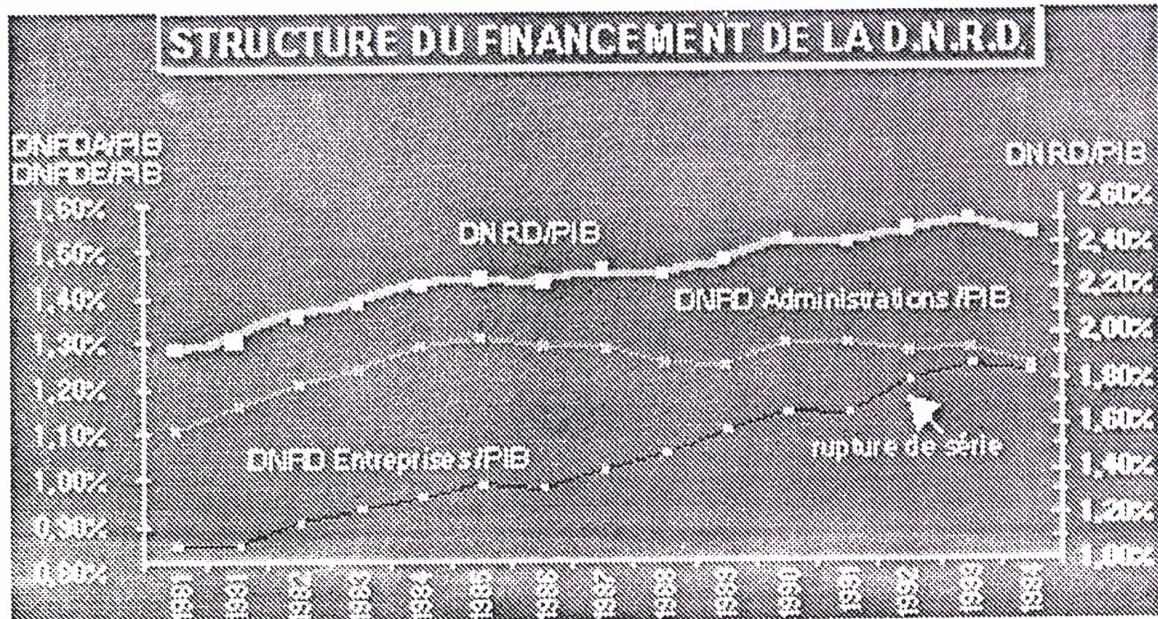
<http://www.mesr.fr/stat/pages/comprpc.htm>

<http://www.mesr.fr/stat/pages/montpays.htm>

	Part / monde (en %)		Part / union européenne (en %)		Indices d'impact *	
	1982	1993	1982	1993	1982	1993
Biologie fondamentale	4,8	5,4	15,7	16,7	0,91	0,92
Recherche médicale	4,1	4,7	11,9	12,8	0,8	0,87
Biologie appliquée, écologie	3,1	3,8	12,4	13,8	0,94	0,98
Chimie	4,8	5,2	16,2	17,4	1,07	1,02
Physique	5,3	5,1	19,0	17,9	1,14	1,10
Sciences de l'univers	3,9	4,8	16,3	16,7	0,88	0,98
Sciences pour l'ingénieur	3,2	3,7	13,5	14,8	1,15	1,03
Mathématiques	4,2	6,7	15,3	21,9	1,21	1,09
<b>Ensemble</b>	<b>4,3</b>	<b>4,9</b>	<b>14,5</b>	<b>15,7</b>	<b>0,98</b>	<b>0,95</b>

	Groupes français	Groupes étrangers	Ensemble des groupes
<b>Effectifs de R&amp;D :</b>			
Équivalent temps plein	101 866	20 769	122 635
en % du total des entreprises	62,00%	10,10%	72,10%
<b>Chercheurs et ingénieurs de R&amp;D :</b>			
Équivalent temps plein	39 066	8 235	47 301
en % du total des entreprises	58,8%	12,40%	71,20%
<b>Dépenses intérieures de R&amp;D :</b>			
Milliards de F	73	13,1	86
en % du total des entreprises	68,00%	12,20%	80,20%
<b>Dépenses extérieures de R&amp;D :</b>			
Milliards de F	22,1	4,8	26,9
en % du total des entreprises	79,40%	10,10%	89,50%
<b>Financement propre du budget total de R&amp;D (2) :</b>			
Milliards F	67,8	12,1	79,9
en % du total des entreprises	61,80%	11,00%	72,80%
<b>Financement public du budget total de R&amp;D (2) :</b>			
Milliards F	17,1	0,2	17,3
en % du total des entreprises	90,10%	1,10%	91,20%
<b>Emploi total des entreprises de R&amp;D concernées</b>			
nombre de personnes	1 610 895	344 546	1 955 441
en % du total des entreprises	42,60%	14,50%	57,10%

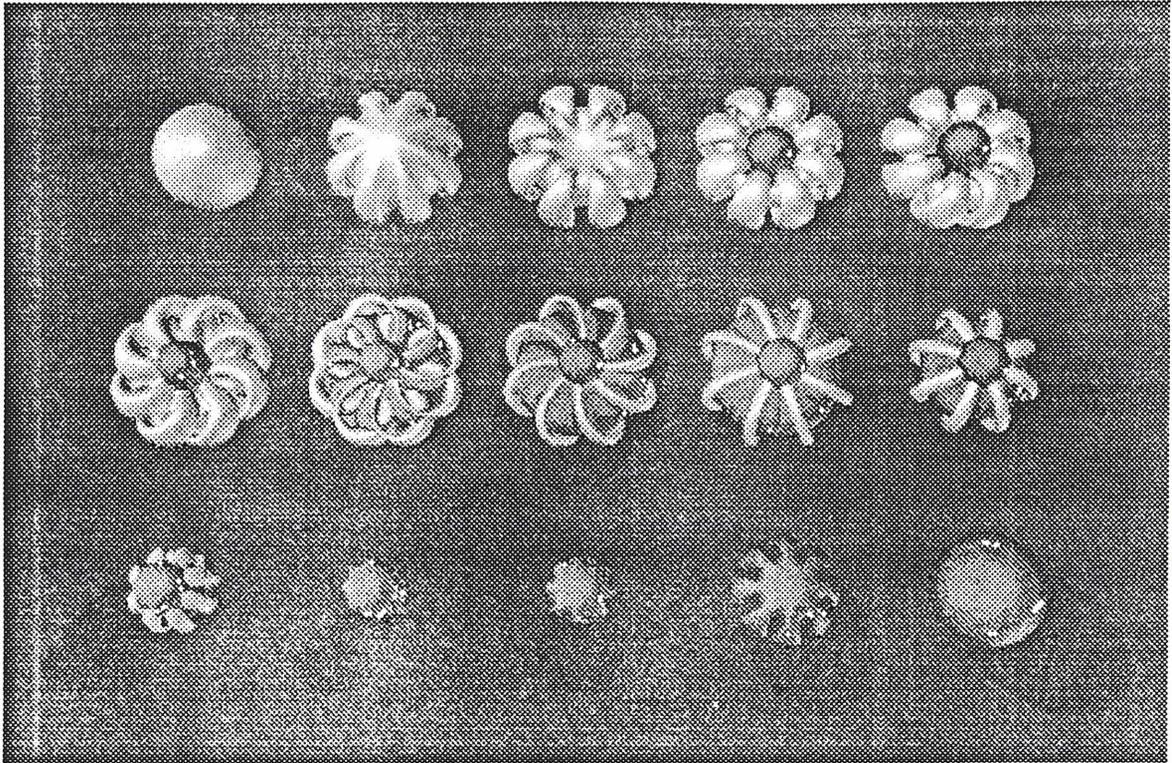
	Part dans le total des dépenses de R&D		Proportion des financements publics (en %)
	des entreprises		
	en MF	en % du total	
Construction aéronautique et spatiale	15 766	14,7%	45,7%
Fab. d'instruments de contrôle, de mesure, de navigation, de précision	11 690	10,9%	21,4%
Fab. d'équipements de communication	11 164	10,4%	10,8%
Construction automobile	12 819	12,0%	0,9%
Pharmacie	11 560	10,8%	0,7%
Chimie	6 540	6,1%	2,6%
Fab. de machines et équipements	5 871	5,5%	7,5%
Energie	4 263	4,0%	1,0%



## **ANNEXE III**

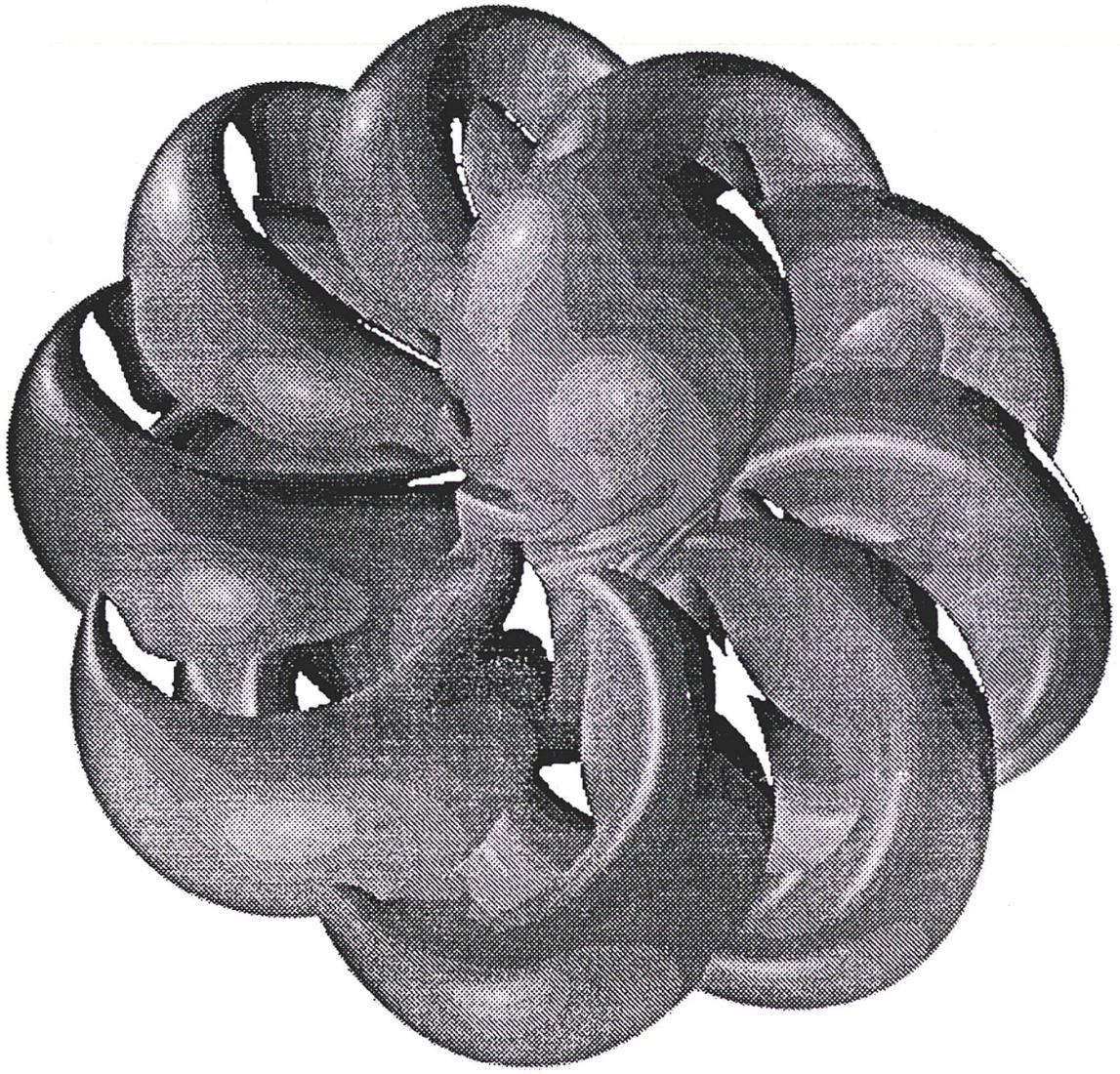
**Images Mathématiques**

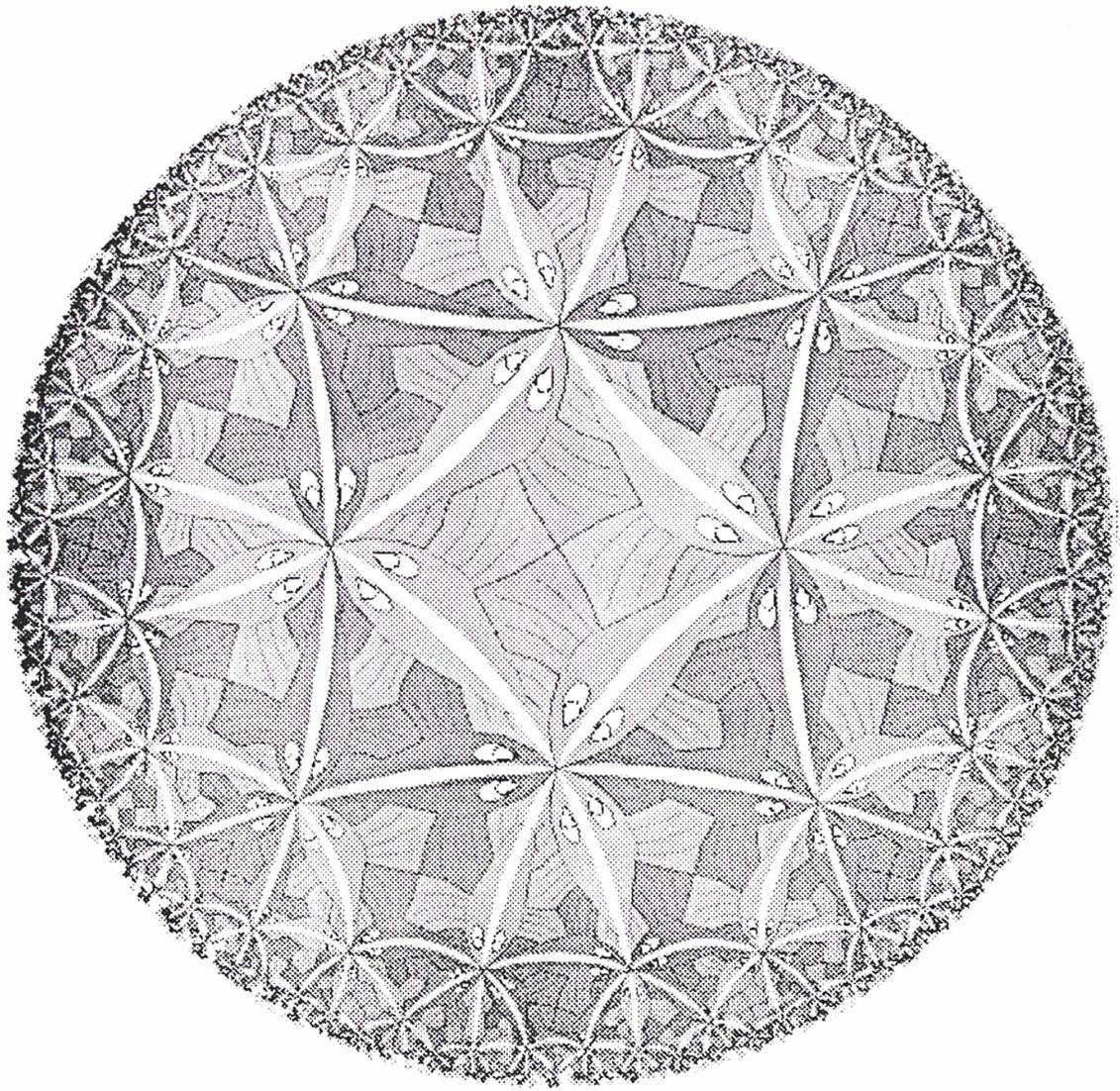
<http://www.geom.umn.edu>



15 étapes d'une inversion de la sphère imaginée par Thurston

<http://www.geom.umn.edu>





Pavage du disque de Poincaré par Escher.