



Stratégie nationale de recherche et d'innovation 2009

Rapport du groupe de travail
Numérique, Calcul Intensif, Mathématiques

RESUME

Ce défi regroupe les sciences du numérique¹, les mathématiques et leurs interactions, ainsi que la modélisation, la simulation numérique, et le calcul intensif. Le choix délibéré d'une définition englobante vise à mettre l'accent sur le continuum entre ces disciplines dotées de références scientifiques communes constituant un corps de doctrine relativement homogène.

Objectif 1 : Soutenir la recherche sur quelques actions stratégiques

Ces éléments ne sont pas exhaustifs et ne se substituent pas aux objectifs des organismes, mais signalent des actions à entreprendre en mobilisant les communautés concernées.

- *Déployer* un grand programme scientifique et technologique sur le thème *de l'Internet du futur*.
- *Développer* des systèmes de recherche et d'expérimentation ainsi que des grands instruments pour soutenir la recherche dans quatre domaines particulièrement porteurs d'innovation :
 - les objets communicants, les systèmes embarqués et l'intelligence ambiante,
 - la modélisation, la simulation et le contrôle de systèmes complexes,
 - l'informatique parallèle et distribuée,
 - la sûreté de fonctionnement et la sécurité.
- *Organiser* un exercice national de prospective sur les nouvelles ruptures scientifiques et technologiques liées à :
 - la convergence entre les mathématiques, l'informatique, la robotique, les capteurs, le traitement du signal et des images avec la biologie, les neurosciences, la médecine, etc.
 - l'analyse des usages et des contenus,
 - le logiciel libre.

Objectif 2 : Promouvoir une organisation efficace de la recherche

- Analyser les impacts des différents modes de financement des équipes de recherche en sciences du numérique.
- Donner un rôle de structuration et de programmation nationale au nouvel institut des mathématiques du CNRS.
- Dynamiser et structurer le considérable potentiel de recherche universitaire en sciences et technologies de l'information par la mise en place d'un comité de coordination nationale autour des trois acteurs jouant le rôle d'agence de moyens, CNRS, INRIA et ANR, impliquant les autres acteurs de la recherche dont les universités, le CEA, et l'Institut Télécom. La mise en place d'un institut interne au CNRS sur ce domaine facilitera la coordination.
- Développer des compétitions autour de grands défis du domaine,

¹ Ce qui englobe, hors dispositifs matériels, l'informatique, l'automatique, la robotique, le traitement du signal et des images, les télécommunications, ainsi que des composantes comme : la bioinformatique, le traitement automatique de la langue, etc. L'électronique, la microélectronique et la convergence avec les nanosciences et nanotechnologies sont traitées dans le défi « Matières et matériaux ».

- Coordonner avec GENCI² les moyens de calcul nationaux et leurs financements,
- Soutenir les initiatives françaises du domaine autour de l'institut européen des technologies (projet « Future Information and Communication Society ») et du forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche (projet « Partnership for Advanced Computing in Europe »).

Objectif 3 : Renforcer la capacité de la France à être un acteur fort de la société numérique

- Renforcer à tous les niveaux (primaire, secondaire et supérieur) les enseignements dans les domaines de l'algorithmique, de la programmation, de la représentation numérique et des mathématiques contemporaines,
- Renforcer le processus d'innovation et de transfert en favorisant :
 - Les relations public / privé, notamment les relations bilatérales,
 - Le rapprochement géographique des acteurs de la recherche et de l'innovation,
 - La création et le développement d'entreprises comme outils de transfert des résultats de la recherche.

² Société civile constituée de quatre partenaires, État, CEA, CNRS et universités, avec une mission de maîtrise d'ouvrage nationale, afin de donner aux chercheurs en calcul intensif les moyens d'une recherche de qualité et de dynamiser l'industrie.

SOMMAIRE

1	DEFINITION, ENJEUX	1
1.1	Périmètre du défi	1
1.2	Enjeux associés au défi	2
1.2.1	Enjeux scientifiques et technologiques	2
1.2.2	Enjeux socioéconomiques	3
1.3	Interactions et interdisciplinarité	5
2	ANALYSE DE LA SITUATION DE LA FRANCE	5
2.1	La production scientifique : comparaison internationale	5
2.1.1	Mathématiques	5
2.1.2	Calcul intensif	5
2.1.3	Sciences du numérique.....	5
2.2	L'organisation et le financement de la recherche et de l'innovation	6
2.2.1	Les laboratoires de recherche, les pôles et les réseaux	6
2.2.2	Le financement	7
2.3	Les forces et faiblesses du système	7
2.3.1	Système de formation.....	7
2.3.2	Système de recherche et production scientifique	8
2.3.3	International et territoires	9
2.3.4	Transfert de technologie et création d'entreprises	10
2.4	Eléments de prospective	11
2.4.1	Les menaces	11
2.4.2	Les opportunités	11
3	L'ANALYSE STRATEGIQUE ET LES LEVIERS D' ACTIONS	12
3.1	Faire face aux ruptures et aux défis scientifiques	12
3.2	Promouvoir une organisation efficace de la recherche	14
3.2.1	Institut de recherche pour les mathématiques	14
3.2.2	Comité de coordination nationale en Sciences et Technologies de l'Information... 14	
3.2.3	Institut de recherche pour les Sciences et Technologies de l'Information.....	15
3.2.4	Grands défis.....	15
3.2.5	Calcul intensif, Europe.....	15
3.3	Créer les conditions d'un changement d'intensité dans l'innovation	16
3.3.1	Les formations, éléments clés de l'innovation	16
3.3.2	Le processus d'innovation.....	16
	ANNEXE - COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL	19

1 DEFINITION, ENJEUX

Performantes et reconnues, les *mathématiques françaises* sont au cœur des enjeux scientifiques et de la connaissance, en prise avec de nombreuses applications technologiques et à la base d'innovations pointues, par exemple en cryptologie pour la sécurité bancaire, mathématiques financières, modélisation, compression des images etc.

En matière de calcul intensif, la France a rattrapé récemment son retard : les avancées s'expriment en termes d'accroissement considérable des moyens de calcul disponibles et de création de logiciels spécialisés performants associés à la réalisation d'applications innovantes.

Arrivées plus récemment, *les sciences du numérique* vivent aujourd'hui un changement d'échelle majeur avec les avancées de la connaissance scientifique, les progrès du logiciel et la diffusion massive de composants logiciels dans les objets les plus divers, le développement d'Internet, l'émergence de nouveaux besoins chez les industriels de tous les secteurs d'activité et chez les consommateurs. Les applications sont multiples : par exemple, la généralisation de capacités de localisation et de communication dans les véhicules automobiles permettra d'améliorer significativement la sécurité des transports ; les systèmes de capteurs dotés de capacités de communication radio permettront la surveillance constante des risques naturels et l'alerte en temps utile des populations concernées par une catastrophe éventuelle (tremblement de terre, tsunami) ; le maintien à domicile des personnes âgées sera facilité par les dispositifs de surveillance médicale à distance et les aides robotiques.

1.1 Périmètre du défi

Le défi « numérique, calcul intensif, mathématiques » recouvre³ :

- les mathématiques et leurs interactions ;
- la modélisation, la simulation numérique, le calcul intensif ;
- les sciences du numérique, entendu au sens des sciences du traitement de l'information⁴.

Nous mettons l'accent sur le continuum entre ces disciplines dotées de références scientifiques communes constituant un corps de doctrine relativement homogène dont procèdent des technologies et des applications.

Mais si la parenté et les liens sont très forts, les positions sont différentes : les mathématiques sont implantées anciennement et bien structurées en France, les sciences du numérique sont d'arrivée récente, en forte croissance et associées à un nouveau secteur industriel tandis que modélisation et simulation, à la jonction des deux, en lien fort avec des disciplines d'application, nécessitent un matériel lourd. C'est pourquoi, dans la suite du texte, ces domaines seront traités selon le cas ensemble ou séparément.

³ Autrement dit, on y retrouve les mathématiques et la partie « logiciel » des STIC. La partie « matériel » et la convergence avec des disciplines comme les nanosciences et nanotechnologies, convergence porteuse de rupture majeure et d'un fort impact économique, sont traitées dans le défi « Matières et matériaux ».

⁴ La notion de sciences du numérique s'avère très large puisqu'elle englobe, hors dispositifs matériels, l'informatique, l'automatique, la robotique, le traitement du signal et des images, les télécommunications, ainsi que d'autres composantes : la bioinformatique, le traitement automatique de la langue, etc.

1.2 Enjeux associés au défi

Les sciences du numérique et les mathématiques font référence à un ensemble de méthodes, d'algorithmes et de techniques dites calculatoires ou *computationnelles* qui permettent la création et l'exploration de nouveaux concepts et outils, ainsi que l'élaboration de modèles, leur identification, leur programmation et leur exploitation en systèmes effectifs. Ces modèles opérationnels sont au cœur de la plupart des avancées scientifiques et des progrès de l'ingénierie. Ils permettent de mieux concevoir, de prototyper virtuellement, de réaliser et de fabriquer des infrastructures et des artefacts de plus en plus complexes, efficaces et sûrs. Ils sont intégrés à ces artefacts et les prolongent en capacités sensorimotrices, en autonomie de fonctionnement ou de décision et en richesse d'interaction avec les humains.

Ces sciences font émerger de nouveaux paradigmes traversant les frontières actuelles des disciplines et sont marquées par de profondes mutations touchant les architectures matérielles et logicielles des ordinateurs, des réseaux et des systèmes embarqués, les modèles de calcul et de programmation, le traitement de données massives devenu un défi essentiel. Ces évolutions radicales concernent directement les objets et les technologies dont la société dépend : transports, communications numériques, média, grands réseaux électriques, production et gestion optimisées d'énergie...

Les enjeux de ce défi sont donc caractérisés par l'émergence continue de nouveaux modes de pensée, de nouveaux concepts et usages, de problèmes difficiles à poser et à résoudre, autant fondamentaux qu'appliqués, dans des contextes souvent pluridisciplinaires.

1.2.1 Enjeux scientifiques et technologiques

Dans la première moitié du vingtième siècle, le développement des mathématiques s'est essentiellement fait suivant une logique interne à la discipline, les applications dans les autres disciplines relevant souvent des découvertes du XIX^e siècle. Avec l'avènement du numérique, les mathématiques se sont trouvées au cœur des enjeux scientifiques. Les exemples sont nombreux de branches de la discipline maintenant directement en prise avec les applications, qu'il s'agisse de cryptologie et sécurité bancaire, de calcul stochastique et mathématiques financières, de nouvelles façons de compresser les images ou les grandes données. Le recours à des méthodes mathématiques performantes contribue ainsi aux progrès scientifiques ou technologiques, parallèlement à l'amélioration des matériels et des logiciels. L'enjeu est double : rester au plus haut niveau dans le développement des mathématiques tout en multipliant leurs interactions, les recherches théoriques d'aujourd'hui garantissant les applications de demain. Ce double processus d'enrichissement interne et d'interaction est l'essence même de cette discipline en pleine mutation⁵.

A la jonction des mathématiques et de l'informatique, le calcul intensif et la simulation illustrent bien le triptyque scientifique fondateur « théorie-expérience-simulation » qui a considérablement modifié la manière de travailler des scientifiques et de certaines industries. Dans le secteur de l'automobile et de l'aéronautique, la simulation a remplacé la plupart des essais. Les défis sont scientifiques mais aussi technologiques, tout en faisant appel aux avancées les plus récentes en mathématiques ou en informatique. Pour illustrer ce dernier point observons que des changements d'échelle considérables sont en cours : en calcul intensif, la haute performance va s'obtenir par d'énormes concentrations de (cœurs de) processeurs atteignant bientôt la centaine de milliers pour atteindre à terme de cinq ans le million voire beaucoup plus. Il est intéressant de constater que de telles infrastructures seront

⁵ *Les mathématiques dans le monde scientifique contemporain*, rapport de l'Académie des Sciences, 2005.

utiles non seulement au calcul scientifique mais aussi à toutes les applications qui viseront à extraire de l'information pertinente de très grandes masses de données complexes.

Les sciences et technologies du numérique connaissent un changement d'échelle majeur par la taille et la complexité des données, des logiciels et des systèmes à l'autonomie croissante, des interfaces et usages diversifiés, et aussi par le couplage de plus en plus intime aux couches matérielles. Ainsi, le réseau Internet met en relation plus de deux milliards de dispositifs hétérogènes et ce chiffre va augmenter massivement. Plus de 95% des processeurs produits sont embarqués pour assurer des services souvent critiques tels le pilotage d'un avion ou le freinage d'un train⁶. L'enjeu est de vaincre la complexité, l'hétérogénéité et l'incertitude inhérentes à ces systèmes pour garantir leur disponibilité et leurs performances. D'autre part, les nouveaux services Internet (messagerie électronique, hébergement de données en ligne, moteurs de recherche, réseaux sociaux, hébergement d'applications, etc.) nécessitent la conception et la mise en œuvre de systèmes informatiques massivement répartis pour lesquels la maîtrise et la prise en compte des interactions avec les utilisateurs et leur simplification sont des exercices difficiles. Enfin, il importe d'être capable de concevoir et de faire fonctionner de très grands systèmes complexes de façon sûre (citons encore le transport ferroviaire ou aérien, l'aérospatial, etc.). La maîtrise de tels systèmes alliant le matériel et le logiciel en interaction avec leur environnement apparaît donc comme un défi majeur.

Souvent invisible, *la technologie numérique est présente partout* (téléphone portable, téléviseur, automobile...). Mais de nombreux nouveaux défis scientifiques restent à relever, en particulier en terme de conception et de mise au point du logiciel et d'objets communicants. Le premier problème, non totalement maîtrisé et de loin, est que chacun des composants d'un logiciel complexe doit fonctionner correctement par rapport à ses spécifications propres. Ensuite, l'interaction intelligente requiert que chaque composant en réseau soit en mesure d'exporter un modèle intelligible des services offerts, d'interpréter correctement les comportements d'autres composants, de modéliser et de gérer les interactions entre les machines et l'humain. Par ailleurs, l'autonomie des robots nécessite des capacités de perception et d'interprétation de l'environnement, de supervision et de diagnostic, d'apprentissage. Bien d'autres questions demeurent quant à la distribution et la communication, l'hétérogénéité, l'interopérabilité, l'évolutivité, l'adaptation au contexte et aux aléas, ainsi que les questions d'autonomie énergétique, fonctionnelle et décisionnelle des objets communicants. Enfin la convergence des sciences du numérique avec d'autres sciences comme la biologie, les neurosciences et nanosciences pose des défis aussi bien scientifiques que techniques.

1.2.2 Enjeux socioéconomiques

Les disciplines du défi sont au cœur du progrès économique et technologique⁷. Elles sont à la base de technologies couvrant plusieurs secteurs économiques, très diffusantes et capacitaires⁸ et représentant un marché en propre, celui des TIC. Les produits qui en sont issus sont diffusés rapidement au sein de la société et adoptés largement par le grand public. On voit apparaître de nouveaux marchés⁹, de nouvelles formes d'organisation du travail et de systèmes d'éducation ainsi que de nouvelles modalités d'accès aux savoirs et à la culture.

⁶ David Tennenhouse, "*Proactive computing*", Communications of the ACM, v.43 n.5, p.43-50, Mai 2000

⁷ OCDE 2008, <http://www.oecd.org/dataoecd/47/1/41019441.pdf>, Report on mathematics and industry. Sur l'innovation, consulter aussi <http://www.france2025.fr/xwiki/bin/view/GroupesDeTravail/AtelierInnovation>.

⁸ Enabling technologies.

⁹ Cf. http://www.industrie.gouv.fr/techno_cles_2010/html/

Pour le secteur des télécommunications, de l'aéronautique, de l'automobile, de l'énergie, des équipements électriques, l'apport du numérique représente une véritable « révolution » qui impacte profondément leur évolution et remet en question les modèles économiques et les usages. Les technologies de l'embarqué permettent d'enfourer de plus en plus de fonctions intelligentes dans les systèmes, qui représentent actuellement environ 20% de la valeur ajoutée des produits¹⁰, pourcentage estimé en croissance de l'ordre de 35 à 40% d'ici 2015. Pour les équipements informatiques, les grandes infrastructures tel Google sont au cœur de la révolution des services et représentent un enjeu économique et stratégique évident. Toutes ces ruptures sont des opportunités de voir émerger de nouveaux acteurs à haute intensité technologique ou de services à forte valeur ajoutée

Pour ces secteurs industriels stratégiques, les sciences du numérique et la simulation numérique de haut niveau se révèlent être des atouts majeurs de compétitivité : elles permettent en effet l'expérimentation « in silico », c'est-à-dire effectuée au moyen de l'outil informatique, l'optimisation de la conception des systèmes avant leur réalisation effective ainsi que l'analyse des connaissances, la veille économique et la gestion des savoir-faire. Dans tous les domaines du défi les acquis de la simulation peuvent accélérer l'amélioration de la productivité et donc de la compétitivité des PME et de l'industrie en général. La simulation est par exemple au cœur des outils permettant de définir avec quelles techniques un champ pétrolier, dont la durée de vie peut être de cinquante ans, va être exploité ! Par ailleurs les technologies de l'embarqué sont un facteur important pour la différenciation des produits grâce à de nouveaux services et pour préserver la compétitivité.

Dans le secteur des services, mais aussi dans celui des loisirs (jeux vidéo, cinéma, télévision), les sciences du numérique permettent de renouveler complètement les processus de création, d'édition et de distribution. Le commerce électronique connaît un essor spectaculaire. Il en va de même des échanges sur Internet, de l'administration électronique, des accès ubiquitaires. Enfin, les moteurs de recherche sont devenus le principal créateur de trafic sur Internet, et l'économie numérique dans son ensemble dépend en grande partie de leurs algorithmes de classement.

Dans les secteurs de la santé et de l'assistance aux personnes, l'imagerie médicale a révolutionné le diagnostic. Les patients pourront bientôt bénéficier de données et d'analyses effectuées automatiquement et diffusées en temps réel à leur médecin, de prothèses intelligentes et d'une surveillance permanente et non-invasive en cas de dépendance. La modélisation du vivant, de la parole, ou de l'audition par exemple ont également une énorme importance scientifique et économique.

Enfin et surtout, le secteur du logiciel est un secteur industriel à part entière. Les entreprises de production de ce logiciel sont en développement rapide. Elles s'autonourrissent des progrès du domaine du numérique, du calcul intensif et des mathématiques.

En résumé, de nombreuses innovations naissent des recherches menées en mathématiques et en sciences du numérique¹¹. Notre compétitivité dans ces disciplines possède une puissante influence sur notre économie. Elle est également essentielle pour l'exercice de notre souveraineté.

¹⁰ http://www.telecom.gouv.fr/fonds_documentaire/rapports/07/cart_lemb.pdf, « Cartographie du secteur des fournisseurs de Logiciels et Services dans le domaine des systèmes embarqués », 1ères Assises Françaises du Logiciel Embarqué, 7 mars 2007.

¹¹ Selon l'enquête IDATE-TNO réalisée en 2005 pour le cluster Eureka ITEA, à horizon 2015 la part du logiciel dans le total de la R&D mondiale représentera 41%.

1.3 Interactions et interdisciplinarité

Les domaines du défi interagissent avec les autres disciplines scientifiques dans un double processus d'interaction et d'enrichissement mutuel. Ces interactions portent sur l'élaboration des théories ou de paradigmes, la formalisation des problèmes et leur modélisation, la conception et la mise au point de codes de calcul. Elles concernent les sciences de la vie (bioinformatique, biomathématiques, bio-automatique, neurosciences), les sciences de l'environnement et de la terre, les sciences de la matière et des matériaux (nanosciences, électronique, etc.), les sciences de l'homme et de la société ou les sciences de l'ingénieur. Ces interactions et la convergence¹² qui en résulte sont porteuses de défis à explorer : la mise sur le marché de nouveaux produits et services suppose l'intégration réussie de plusieurs technologies qui sont l'objet de la recherche intégrative.

2 ANALYSE DE LA SITUATION DE LA FRANCE

2.1 La production scientifique : comparaison internationale

2.1.1 Mathématiques

Les mathématiques sont la seule discipline où la France figure en second rang au Web of Science (WoS), derrière les Etats-Unis. La part de publications mathématiques françaises dans les publications mathématiques mondiales est de 7,4 % contre 4,7% pour l'ensemble des publications scientifiques françaises. Les nombreux prix internationaux prestigieux décernés aux mathématiciens français (dont neuf médailles Fields sur les 48 décernées depuis 1938), les invitations dans les colloques internationaux de renom et l'attractivité de la France pour les meilleurs mathématiciens étrangers, témoignent de l'excellence de l'école française des mathématiques.

2.1.2 Calcul intensif

L'activité en calcul intensif, en particulier en publications, est en général comptabilisée dans d'autres disciplines, ce qui fait que les comparaisons internationales chiffrées sont difficiles. Notons cependant la bonne reconnaissance des équipes françaises, illustrée récemment par l'annonce de la société Intel de situer en région parisienne, en partenariat avec le CEA, la société civile GENCI¹³ et l'Université de Versailles Saint Quentin, un de ses nouveaux laboratoires européens de recherche sur le domaine. Pour ce qui est des moyens de calcul disponibles, la France connaissait jusqu'à très récemment un retard alarmant. Entre 2006 et 2008, grâce à la nouvelle dynamique impulsée par GENCI, la France a multiplié la puissance de calcul disponible pour la recherche française par 25 et est passée du 5^{ème} rang au 3^{ème} rang dans le classement des 500 ordinateurs les plus puissants¹⁴.

2.1.3 Sciences du numérique

Il est difficile de chiffrer la production scientifique du domaine¹⁵. En termes de publications, le référentiel mondial du WoS n'est pas adapté : la discipline n'y est pas bien identifiée, les publications de conférences sélectives, essentielles dans le domaine, sont ignorées. Cependant, le WoS est le seul référentiel et une comparaison de la production scientifique de

¹² Convergence NBIC : Nano, Bio, Info, Cognition.

¹³ Cf. note 2 page 3.

¹⁴ Cf. colloque « Grands Challenges » CINES-Genci, <http://www.genci.fr/spip.php?article31>, <http://www.top500.org>.

¹⁵ Cf. communiqué Académie des Sciences, 5 février 2009.

la France et de son évolution par rapport aux autres pays est indispensable au pilotage. Le ministère chargé de la recherche a donc commandé une étude à l'OST¹⁶, étude basée sur une identification par des experts du domaine des publications pertinentes avec le postulat que le biais introduit par la mauvaise représentativité du WoS est le même pour tous les pays. Ce postulat reste à démontrer par une étude similaire sur un corpus plus représentatif qui pourrait être celui de l'Association for Computing Machinery (ACM)¹⁷.

L'étude de l'OST montre que, jusqu'en 2001, plus de 50 % de la production mondiale concernait la contribution de cinq pays : Etats-Unis, Japon, Royaume-Uni, Allemagne, France. Les dernières années ont connu des bouleversements importants avec deux nouvelles « arrivées », la Chine mais aussi la Corée ; la France a ainsi perdu deux places dans le classement mondial des parts de publications (de la 5^{ème} à la 7^{ème} place) mais conserve une 6^{ème} place devant la Corée pour l'indice d'impact. Le Royaume-Uni et l'Allemagne ont également été devancés par la Chine et sont maintenant respectivement, pour les publications, à la 4^{ème} et 5^{ème} place. Les USA ont conservé la tête du classement mais on vu leur part de publications chuter de 11%. Cette tendance serait à corroborer par une analyse plus qualitative.

2.2 L'organisation et le financement de la recherche et de l'innovation

2.2.1 Les laboratoires de recherche, les pôles et les réseaux

Au niveau académique et contrairement à d'autres disciplines scientifiques, celles du défi sont caractérisées par une forte majorité d'enseignants chercheurs : 8 200 enseignants chercheurs, soit plus de 80 % des scientifiques du domaine, pour seulement 1 500 chercheurs¹⁸. Réalisée essentiellement au sein de laboratoires universitaires, cette recherche académique est menée conjointement avec les deux acteurs nationaux que sont le CNRS et l'INRIA et bénéficie des programmes de l'ANR et de l'Europe. D'autres acteurs comme l'Institut Telecom et des laboratoires d'écoles complètent le tableau. La place de la recherche dans beaucoup d'écoles pour ces disciplines est en général faible, même si elle commence à se structurer. Par ailleurs deux Réseaux Thématiques de Recherche Avancées (RTRA) travaillent sur le champ considéré, Digiteo sur le plateau de Saclay et Fondation Sciences Mathématiques de Paris.

Au niveau de la recherche technologique, le CEA joue un rôle majeur en complétant le dispositif académique par une recherche intégrative couvrant le numérique et son intégration dans les systèmes. De plus il faut noter la structuration nouvelle d'une alliance STIC au sein des instituts Carnot à l'image des organisations thématiques existantes dans les Fraunhofer. Enfin sept pôles de compétitivité mondiaux ou ayant vocation à l'être visent à favoriser les activités de recherche conjointes entre les mondes académique et industriel et à développer ainsi le transfert de connaissance et de technologies : Minalogic en Rhône-Alpes, Solutions Communicantes Sécurisées en PACA, System@tic en Ile-de-France, Image et Réseaux en Bretagne, Cap Digital en Ile-de-France, Loisirs Numériques en Rhône-Alpes et Transactions électroniques sécurisées en Basse-Normandie.

¹⁶ Rapport de l'OST à la demande du MESR / DGRI, mai 2008 : « Développement d'indicateurs pour l'aide à la décision en matière de coopération scientifique internationale, le cas des STIC ».

¹⁷ <http://www.acm.org/>

¹⁸ Les chiffres de ce § proviennent des bases de données du MESR et des organismes. Ces 1500 chercheurs se répartissent en 500 en mathématiques et 500 en sciences du numérique au CNRS, et 500 à l'INRIA (fin 2007).

2.2.2 Le financement

Au sein de la sphère publique, les crédits¹⁹ affectés en 2008 à la recherche en STIC, c'est-à-dire **associant les sciences du numérique et l'électronique**, s'élèvent à 1 224 M€ soit 9% des crédits budgétaires affectés à la recherche. Trois organismes en cumulent près de la moitié : le CNRS (213 M€), le CEA (216 M€) et l'INRIA (142 M€). Le ministère chargé de l'industrie finance l'Institut Telecom (105M€)²⁰ et consacre 130 M€aux laboratoires publics sur les 420 M€du fonds de compétitivité des entreprises, principalement distribuées entre le soutien à la recherche industrielle stratégique et les actions de soutien et de diffusion de l'innovation technologique. L'ANR (130 M€) et OSEO Innovation ont consacré plus de 20 % de leurs crédits budgétaires à cet objectif et l'ex-AII 40%. Il faut signaler enfin quelques récentes fondations (EADS, FRAE, etc.) contribuant au financement de laboratoires publics.

Dans le secteur privé, le numérique contribue par les innovations induites dans les services et par les contenus logiciels à élever significativement la valeur ajoutée des produits. Au niveau mondial, la R&D en STIC représente 27% de la R&D totale. Parmi les 1000 sociétés européennes classées selon leur niveau de dépenses en recherche et développement figurent 112 sociétés françaises dont 29 très directement liées aux sciences du numérique incluant 18 dans le domaine des logiciels²¹. L'ensemble de ces sociétés dépensent en R&D environ 2,7 Mds €, ce qui est finalement peu si l'on considère le niveau de dépenses des 100 premières sociétés, évalué à 21,2 Mds €. Mais leurs difficultés financières les amènent souvent soit à diminuer globalement les crédits de R&D, soit à se tourner vers des thématiques à plus court terme. Ainsi le niveau d'investissement en R&D des entreprises européennes dans le domaine des STIC est d'un tiers moindre qu'aux Etats-Unis ou au Japon, la France se situant dans le bas du tableau²². Corrélativement, les crédits publics destinés aux entreprises dans le domaine des STIC sont aux Etats-Unis quatre fois supérieurs à ceux de l'Europe²³. La France fait partie des pays pour lesquels ces crédits stagnent ou diminuent. La montée en puissance de mécanismes incitatifs comme le crédit impôt recherche pourrait contribuer à rééquilibrer la situation.

2.3 Les forces et faiblesses du système

2.3.1 Système de formation

L'offre de formation en mathématiques a été complétée récemment par l'émergence de nombreuses filières universitaires en ingénierie. Les classes préparatoires dispensent une formation conséquente destinée à la sélection mais qui n'est pas poursuivie au même niveau dans les écoles d'ingénieurs, aboutissant à un déficit de formation sur les évolutions récentes de la discipline. Le vivier des étudiants à l'université est relativement faible. Pour l'avenir, le défi est double : assurer dans les universités et les écoles des formations qui permettront de maintenir le recrutement des chercheurs et enseignants-chercheurs, et offrir une meilleure utilisation des compétences mathématiques dans la société.

Pour les sciences du numérique, l'offre de formation est très complète et variée dans les universités et les IUT. Un étudiant titulaire d'un master professionnel en informatique trouve rapidement un emploi de bon niveau. Hors universités, l'offre est plus inégale : on trouve quelques bonnes écoles d'ingénieurs sélectives comme les écoles de l'Institut Telecom, SupElec, les INSA, l'ENSIMAG, des écoles moins sélectives comme l'ISUP ou les SupInfo

¹⁹ MESR, Jaune 2008, page 70.

²⁰ Subvention 2009 pour les missions de recherche et de formation

²¹ Cf. ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/ist/docs/embedded/final-study-181105_en.pdf

²² MESR, Enquête réalisée en 2006 par le GFII pour le compte de la DGRI sur les dépenses de R&D internationales.

²³ Même enquête GFII.

régionales et certaines filières spécialisées d'écoles généralistes²⁴. Dans les filières non spécialisées des écoles, l'enseignement de l'informatique est généralement réduit.

De façon plus générale, le système éducatif n'a pas donné une place suffisante à ces disciplines en regard des enjeux futurs, industriels et d'innovation pour l'ensemble de l'économie nationale, et de participation à la vie sociale et politique de la part des citoyens. Absentes aux niveaux primaire et secondaire, elles sont inexistantes ou trop limitées dans les classes préparatoires aux grandes écoles²⁵. La majorité des ingénieurs et chercheurs non informaticiens n'acquiescent pendant leur cursus qu'un bagage limité au regard de ce que l'on observe dans les autres disciplines. Pourtant, ils utiliseront ou pourront avoir à décider de l'utilisation d'outils informatiques sophistiqués. Il est à craindre qu'ils ne le feront pas avec un rendement optimal ou que, en position de responsabilité, ils sous-estimeront l'importance du secteur.

Quant au calcul intensif, il existe peu de formations et même peu de modules internes à d'autres formations, à l'exception des formations « techniques » dans les centres nationaux, de quelques séminaires ciblés et parcours de masters teintés « calcul haute performance ».

Par ailleurs, ces sciences du numérique et de la simulation sont souvent enseignées d'un point de vue utilitariste alors que, plus que jamais, la connaissance des concepts fondamentaux est indispensable à leur utilisation créative dans la recherche et dans le monde de l'entreprise.

2.3.2 Système de recherche et production scientifique

Le paysage français de la recherche publique en matière de mathématiques est reconnu internationalement. La force de l'école mathématique française est due à sa présence, homogène en qualité, dans à peu près toutes les branches des mathématiques et sa forte structuration nationale qui lui permettent entre autres de faire face aux évolutions de la discipline. Le CNRS a eu un rôle important et positif dans cette structuration. Il convient d'inciter les universités nouvellement autonomes à préserver une structuration nationale efficace et, notamment, ses outils de mutualisation comme par exemple, le CIRM, l'IHP, l'IHES, le CIMPA²⁶, et le réseau de bibliothèques de mathématiques.

Dans le domaine de la simulation numérique et du calcul intensif, le savoir faire français est compétitif au plan international, notamment grâce à l'action dans la durée du CEA, de l'INRIA, d'universités telles que Paris 6, Bordeaux, Grenoble, Versailles St Quentin et du CERFACS. Dans ce domaine, le CEMRACS²⁷ constitue une initiative particulièrement intéressante. Ce dispositif demande à être complété en consolidant les équipes interdisciplinaires développant les grandes applications (par exemple, simulation météorologique ou biologie moléculaire) par des compétences en informatique parallèle et en mathématiques appliquées.

D'autre part, les nouveaux paradigmes de calcul massivement distribués, comme par exemple les moteurs de recherche ou les réseaux sociaux, distribués sur des centaines de milliers de machines, sont en train de s'imposer comme infrastructure informatique fondamentale pour tous les services hébergés sur Internet. Le savoir faire français en la matière doit être mis à profit pour positionner la France au meilleur niveau sur ces architectures Internet émergentes.

²⁴ Cf. <http://www.cedefi.fr/>

²⁵ Voir sur ce sujet le site du groupe de travail ITIC de l'ASTI : <http://asti.ibisc.univ-evry.fr/groupe-itic/> ainsi que <http://www.france2025.fr/xwiki/bin/view/France2025/LenseignementdelinformatiqueetdesTIC>

²⁶ CIRM : Centre International de Rencontres Mathématiques. IHP : Institut Henri Poincaré. IHES : Institut des Hautes Etudes Scientifiques. CIMPA : Centre International de Mathématiques Pures et Appliquées. CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique.

²⁷ Centre d'Eté de Mathématiques et de Recherche Avancée en Calcul Scientifique

Dans les sciences du numérique, en termes d'indices bibliométriques, la recherche française ne garde qu'une position honorable et ce, malgré la priorité nationale qui lui a été accordée par l'Etat en 2000²⁸. Il existe sans doute plusieurs raisons :

- la première est que, comme le souligne le rapport de la cour des comptes²⁹, cette priorité ne s'est pas traduite par une augmentation de budget,
- la seconde est que la coexistence non concertée de deux organismes nationaux CNRS et INRIA ne permet pas d'exploiter pleinement la fonction « programmation » essentielle à la structuration et à l'essor d'une discipline,
- une troisième raison est que le nombre important d'enseignants chercheurs, recrutés sur une base géographique adaptée aux besoins de formation dans les universités, n'a pas été équilibré par des décharges d'enseignement et un encadrement technique suffisant pour une discipline où le fonctionnement en projets (ANR, PCRDT ou autres) et l'interaction avec les autres disciplines et technologies se développent fortement³⁰. Ces mécanismes d'incitation sont essentiels pour dynamiser et structurer la recherche, notamment partenariale. Ils sont également très favorables à l'insertion professionnelle des doctorants dans les entreprises. Cependant, ils risquent d'avoir un apport au développement global de la recherche en informatique de plus en plus sous-optimal si rien n'est fait pour corriger le déséquilibre constaté entre fonctions de recherche et d'appui.

2.3.3 International et territoires

L'Europe, a accumulé un retard en sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC³¹, y compris l'électronique) par rapport aux Etats-Unis, au Japon et à l'Inde, la France se situant dans la moyenne européenne. Si, entre 1993 et 1999, la plupart des pays de l'OCDE ont augmenté leurs investissements STIC, les crédits publics qui leur étaient destinés étaient deux fois plus élevés aux Etats-Unis qu'en Europe. De même, le volume de la R&D ramené au PIB dans les entreprises du domaine était de l'ordre de 0,5% aux USA, de 0,7 % au Japon contre 0,25 % en Europe. En France, sur la même période, le soutien public aux STIC a diminué de plus de 20 % par rapport à la période 1985-1990³².

De façon générale, l'investissement en R&D français est insuffisant et l'effet de levier de la dépense publique sur la R&D des entreprises demeure faible³³. La France et l'Europe tentent de répondre à la montée en puissance des pays asiatiques notamment par la construction de pôles territoriaux alliant formation, recherche et innovation.

²⁸ La situation est analogue pour les entreprises du secteur (note de Mireille Campana).

²⁹ Cour des Comptes, <http://www.ccomptes.fr/fr/CC/documents/RPA/7RechercheStic.pdf>, mai 2007, pour tout le §.

³⁰ Le financement attribué à un chercheur en informatique par l'ANR ou le PCRDT est en moyenne environ deux fois supérieur à celui d'un chercheur d'une autre discipline scientifique.

³¹ Les documents utilisés ne nous permettent pas de séparer l'électronique des sciences du numérique.

³² Cour des Comptes, <http://www.ccomptes.fr/fr/CC/documents/RPA/7RechercheStic.pdf>, mai 2007, page 165.

³³ Enquête GFII déjà citée.

2.3.4 Transfert de technologie et création d'entreprises

L'existence de grandes sociétés comme France Telecom, Alcatel Lucent, Thales, Bull ou Thomson, d'importantes sociétés de services informatiques (SSII) leaders mais aussi de PME, montrent que la France est bien présente sur le créneau porteur des sciences du numérique. En matière d'édition de logiciels, il est possible de citer Dassault Systèmes, ESI Group³⁴, ou Mecalog³⁵, qui sont des leaders mondiaux dans le domaine de la simulation numérique, ou encore Business Objects³⁶. Des expériences réussies de transfert et de créations d'entreprises avec notamment le CEA, l'INRIA et l'Institut Telecom³⁷ existent également.

Cependant, la recherche demeure moins valorisée que chez nos principaux concurrents³⁸. Si ce constat ne concerne pas seulement les sciences du numérique, les implications économiques sont telles que cette faiblesse structurelle prend une importance toute particulière. Le rapport de l'IGAENR et le rapport « France Numérique 2012 » montrent que la France est plutôt bien placée en termes de création de start-up, donc en matière de valorisation directe de travaux de recherche, mais soulignent l'absence de dispositifs de soutien et d'écosystèmes favorisant leur croissance, contrairement aux USA. *C'est donc un problème d'environnement économique global*, les chercheurs et les sociétés innovantes parvenant apparemment plus difficilement à convaincre les investisseurs sur la phase d'industrialisation de leurs travaux.

Un facteur d'explication parmi d'autres est l'absence de compréhension entre le monde de la recherche et celui de l'économie. D'autres facteurs peuvent être avancés comme la difficulté d'accès à un marché européen trop fragmenté pour permettre la croissance des jeunes pousses et l'absence de grands centres d'intégration.

Par ailleurs les collaborations industrielles créées à l'occasion de projets financés par l'ANR, les pôles de compétitivité ou l'Europe, accroissent les réseaux relationnels des chercheurs publics et privés et préparent ainsi le terrain d'un écosystème d'innovation. Cependant, les relations bilatérales essentielles au transfert de technologie sont insuffisantes et doivent être renforcées.

En mathématiques, les interactions avec le secteur industriel sont en forte croissance, impliquant un nombre croissant de laboratoires universitaires. Néanmoins, le niveau de ces interactions reste insuffisant au regard des besoins du milieu industriel et économique et des compétences du monde académique³⁹. Les problématiques nombreuses soulevées par l'entreprise nécessitent, entre autres, l'intervention de mathématiciens : modélisation, simulations, sûreté, optimisation et gestion de moyens, analyses prédictives, communications etc. Le milieu académique doit poursuivre ses efforts de promotion des recherches partenariales avec le monde industriel. Si une prise de conscience existe, des efforts restent à faire notamment en termes de reconnaissance de ce type de recherche. Inversement le monde industriel et économique doit se convaincre que les mathématiques peuvent l'aider à résoudre certains de ses défis.

³⁴ <http://www.esi-group.com/>

³⁵ Racheté en 2006 par Altair Engineering - USA

³⁶ Racheté par le groupe allemand SAP en 2008

³⁷ Rapport IGAENR <http://www.education.gouv.fr/pid258/les-rapports-i.g.a.e.n.r.html>, Valorisation de la recherche, 2007.

³⁸ Rapport IGAENR déjà cité.

³⁹ Rapport OCDE Global Science Forum on « Mathematics in Industry » 2008, July.

2.4 Éléments de prospective

2.4.1 Les menaces

Pour le numérique, la concurrence des pays émergents est forte : ils produisent des ingénieurs et des chercheurs d'un bon niveau pour des niveaux de salaire très compétitifs⁴⁰. Qui plus est, ils sont beaucoup plus efficaces dans la valorisation des résultats de la recherche,

Dans un contexte de vive compétition sur des domaines scientifiques à fort potentiel de valorisation, les sciences du numérique ont un déficit de reconnaissance en tant que discipline fondamentale. Une erreur serait de sous-estimer l'importance d'une recherche de base orientée sur le long terme et les projets à risques en n'y consacrant pas les moyens suffisants : toutes les inventions qui ont donné lieu à des innovations majeures en informatique - ou presque - sont venues de laboratoires de recherche⁴¹.

Pour les mathématiques, où la recherche fondamentale est évidemment également essentielle, les départs à la retraite relativement nombreux dans les années à venir, corrélés à une population étudiante en diminution, peuvent être l'occasion d'un nouveau souffle ou... d'un naufrage ! Le remplacement d'une partie importante de la population d'enseignants chercheurs et de chercheurs peut se transformer en une opportunité unique de renouvellement et d'attraction des meilleurs talents pour maintenir les mathématiques au meilleur niveau dans les universités et au CNRS.

2.4.2 Les opportunités

L'explosion de la demande pour les sciences du numérique et les mathématiques est réelle quels que soient les secteurs considérés. L'analyse des croisements avec les autres défis a montré les extraordinaires potentialités. Les priorités nationales que sont la préservation de l'environnement, la maîtrise de l'énergie, la santé publique, la sécurité, sont en attente des avancées scientifiques et technologiques de ces domaines. D'ores et déjà de nouvelles branches se développent en réponse aux sollicitations des autres disciplines et des entreprises. Enfin, l'installation de nouveaux équipements de calcul laisse augurer des applications et des techniques de simulation nouvelles et en rupture.

La mise en œuvre de la loi relative aux libertés et responsabilités des universités, en leur conférant une autonomie certaine, devrait offrir les conditions à même de favoriser ces disciplines à fort potentiel de valorisation sur le plan de l'innovation et de la formation, notamment par une implication accrue dans les pôles de compétitivité. Ceci nécessite un renforcement des capacités de recherche et d'enseignement.

La construction de l'espace européen de la recherche, les objectifs ambitieux du processus de Lisbonne, ont créé les conditions d'un effort important en faveur de la recherche et du développement. La commission européenne promeut également la création de plates formes technologiques européennes autour de sujets phares comme les systèmes embarqués, les logiciels et les communications satellitaires. Les sciences du numérique ont pleinement vocation à bénéficier de ces initiatives. Dans le domaine du calcul intensif, le projet PRACE a pour objectif de préparer la mise en place d'une infrastructure européenne de calcul de haute performance dès 2010. Le projet rassemble seize pays dont la France, représentée par Genci, qui joue un rôle de partenaire principal, c'est-à-dire représentant un pays candidat à l'accueil d'un des centres de calcul à visibilité internationale, et ce dès la fin de l'année 2010.

⁴⁰ Cf. J-C. Prager, « les enjeux des techniques de l'information et de la communication », Cahier Cercle Economistes n° 7, avril 2005.

⁴¹ Cf. Andrea Bonaccorsi, European competitiveness in Information Technology and long term scientific performance, OCDE, Expert Group on *The role of the Community research policy in the knowledge-based economy*, January 2009.

3 L'ANALYSE STRATEGIQUE ET LES LEVIERS D'ACTIONS

Les mathématiques et les sciences du numérique abordent des défis majeurs tant dans leurs propres fondements scientifiques que dans les prolongements et synergies interdisciplinaires ainsi que leurs applications. C'est pourquoi, il importe de faciliter l'implication des chercheurs dans les équipes pluridisciplinaires abordant les grands défis des autres disciplines⁴².

Il est essentiel d'asseoir la politique scientifique dans ce domaine sur une recherche de qualité conjuguant une double démarche :

- une recherche de base, sans priorité thématique, couvrant un large spectre des disciplines des mathématiques et des sciences du numérique (fonctionnement essentiellement sur un mode « bottom-up », donnant lieu à des programmes de soutien « blancs », basé sur la seule excellence académique),
- une *recherche programmatique ouverte aux partenariats avec l'industrie* focalisée sur quelques priorités associées à des enjeux majeurs et se déclinant en programmes à long terme coordonnés au niveau national, visant principalement des intégrations pluri-thématiques ou pluridisciplinaires (fonctionnement davantage piloté autour de programmes thématiques).

3.1 Faire face aux ruptures et aux défis scientifiques

Les éléments qui suivent sont issus du travail du Groupe de Concertation Sectoriel A3 de la DGRI mis en place en 2007. Réunissant les divers acteurs de la programmation de la recherche et les ministères concernés, le groupe a identifié quelques thèmes nécessitant une coordination nationale ou une impulsion de l'Etat. Ils ne sont pas exhaustifs et ne se substituent pas aux objectifs des organismes, mais signalent des actions à entreprendre en mobilisant les communautés concernées.

- **L'Internet** est une infrastructure stratégique de services de communication de l'informatique répartie qui joue un rôle économique et sociétal majeur. Conçu en 1974 dans ses principes de base, il doit maintenant évoluer pour répondre aux besoins des objets communicants, des nouveaux services et modes d'utilisation. *Il est essentiel de déployer sur le thème de l'Internet du futur un grand programme scientifique et technologique et de l'inscrire dans une dynamique européenne* afin d'être en mesure de concurrencer les Etats-Unis et la Chine sur ce domaine⁴³.
- **Avec les objets communicants et les systèmes embarqués, l'intelligence ambiante** vise à offrir un espace quotidien « intelligent » de communication, d'accès à l'information ou à des services numériques permettant une utilisation adaptée, naturelle et conviviale. Ces thèmes comptent parmi les moteurs les plus puissants pour le développement des STI pendant les dix prochaines années. Cela nécessite une recherche tant fondamentale qu'intégrative et pluridisciplinaire, *et la mise en place d'un instrument national d'expérimentation*⁴⁴.
- **La modélisation, la simulation et le contrôle de systèmes complexes** très variés posent des problèmes multiples très difficiles, en automatique et traitement du signal, en

⁴² Ceci demande notamment une gestion fine et individualisée de l'évaluation pour éviter que l'implication pluridisciplinaire ne soit pénalisante en terme de carrière.

⁴³ Rapport MINEFI DGE, INRIA, Telecom, décembre 2008, Internet du Futur.

⁴⁴ Rapport MESR, CNRS, GCS A3, octobre 2008, Intelligence ambiante.

algorithmique, en calcul intensif ou pour la gestion et la représentation de flux de données importants. *Dans ce domaine, la mise en œuvre des recommandations du CSCI et l'engagement dans le projet PRACE* doivent être résolument poursuivis⁴⁵ : les futures infrastructures sont à mettre en cohérence avec les centres nationaux et les méso-centres, l'accès des industriels à ces équipements doit être facilité, des projets de développements applicatifs sont à créer autour d'équipes pluridisciplinaires, rassemblant les spécialistes d'une discipline avec des mathématiciens et des informaticiens. Les initiatives du type de celle lancée par le CEA et le CNRS avec la « Maison de la Simulation » située sur le Plateau de Saclay doivent être encouragées en y associant fortement les universités.

- **L'informatique parallèle et distribuée**, réseaux, grilles, Cloud Computing, multi-cœurs, machines contenant une très grande quantité de composants, portent l'enjeu de gains importants en performances et en sûreté. Mais ils posent des questions difficiles de modèles de calcul, d'algorithmique, d'architecture logicielle qui ouvrent des problèmes de recherche importants en sémantique, en algorithmique, en programmation, en compilation de code, en vérification, etc. *De grands instruments dédiés à la recherche sur ces sujets sont nécessaires*⁴⁶.

- L'utilisation diffusante des technologies numériques soulève de multiples problèmes **de sûreté de fonctionnement, de sécurité** et de responsabilité. Les résoudre repose sur des fondements théoriques difficiles, et passe par la mise en œuvre de méthodes formelles de vérification, de certification de code et de composants logiciels et de sécurisation. *La création d'un grand instrument de recherche sur ce sujet est indispensable*⁴⁷.

Outre les éléments de réflexion issus du travail du Groupe de Concertation Sectoriel A3, d'autres priorités à fort enjeux doivent être soutenues et des réflexions prospectives sur ces sujets doivent être engagées. Citons :

- La **convergence** entre les mathématiques, l'informatique, la robotique, les capteurs, le traitement du signal et des images d'une part et la biologie, les neurosciences, la médecine d'autre part, qui créera les conditions d'une nouvelle rupture. Il convient d'organiser dès maintenant un exercice national de prospective sur cette question.

- L'explosion des **contenus numériques** pour le jeu, le cinéma l'audiovisuel et l'Internet posent de nouveaux problèmes en terme de complexité, d'indexation, d'annotation de mode d'accès, d'échange et de partage. Une réflexion doit être entamée sur l'organisation des activités de la recherche pour faire face aux défis de la création, des interfaces, des moteurs de recherche et des outils de coopération.

- Le **Logiciel Libre** change la façon de concevoir, développer, distribuer, maintenir, utiliser et commercialiser les logiciels. Dans un continuum entre la recherche fondamentale et le développement industriel, des lieux de recherche, transfert et valorisation pourraient être spécifiquement orientés sur le Logiciel Libre.

⁴⁵ Rapport MESR, Comité Stratégique du Calcul Intensif présidé par Olivier Pironneau, décembre 2008.

⁴⁶ Rapport MESR/GCS A3, septembre 2008, Grilles.

⁴⁷ Rapports MESR/GCS A3, juillet 2008 Sécurité informatique <http://scoulond.insa-lyon.fr/dgri/>,

3.2 Promouvoir une organisation efficace de la recherche

Il est essentiel que, dans leur nouveau cadre de responsabilités, les universités, en concertation étroite avec les organismes de recherche, confortent la recherche en mathématiques et en sciences du numérique en privilégiant l'interface avec les applications et les projets à risques et à long terme : ceux-ci sont souvent à l'origine de découvertes qui bouleversent la société et le monde des sciences et de la connaissance. Pour compléter ce dispositif, il est indispensable que des acteurs moteurs de la recherche partenariale, comme par exemple les instituts Carnot, se couplent étroitement avec les universités et la recherche académique.

Pour être en mesure de piloter intelligemment la recherche dans des sciences sujettes à une forte demande sociétale, il conviendra d'analyser les différents modes de financement des équipes : apprécier les ressources consolidées en distinguant les financements récurrents, les financements incitatifs sur des programmes type « blancs » et les financements incitatifs sur des programmes finalisés. Cette analyse doit permettre d'éclairer l'équilibre entre recherche bottom-up et recherche programmatique, en fonction des objectifs et de l'orientation des équipes. Il sera pour cela nécessaire de se doter d'indicateurs d'évaluation fiables et pertinents, d'inventer comment évaluer les projets à risques et de réfléchir à la mesure de l'activité de production de logiciels, activité chronophage mais indispensable.

3.2.1 Institut de recherche pour les mathématiques

Il est crucial de préserver le tissu de grande qualité construit par les mathématiciens français au fil des ans. Pour satisfaire ces exigences, il est nécessaire que le nouvel institut du CNRS ait une vocation nationale, avec pour mission de maintenir l'attractivité et le rayonnement international des mathématiques au plus haut niveau tout en répondant aux sollicitations des autres disciplines et des entreprises⁴⁸. Il doit être doté de moyens lui permettant notamment de coordonner et de faire évoluer les grands instruments de la recherche en mathématiques que sont le CIRM, l'IHP, l'IHES et le CIMPA, ainsi que les réseaux de bibliothèques et la documentation⁴⁹. En organisant les fédérations régionales, les réseaux thématiques nationaux et les réseaux de métiers, ce futur institut des mathématiques doit continuer à jouer le rôle fondamental de structuration et de programmation de la politique nationale de la recherche dans le domaine des mathématiques en partenariat avec les universités. Dans un objectif d'excellence, il doit aussi renforcer, l'attractivité de la France vis à vis des étudiants en mathématiques de haut niveau. Ceci demande des moyens appropriés, financiers, mais aussi d'encadrement administratif, technique et scientifique des laboratoires. Il sera fondamental de veiller au partenariat entre cet institut et les autres instituts, notamment celui pour les sciences et technologies de l'information, ainsi qu'à la coordination avec l'INRIA pour le champ des mathématiques concerné.

3.2.2 Comité de coordination nationale en Sciences et Technologies de l'Information

La programmation de la recherche consiste en la traduction des orientations définies par le gouvernement en priorités de recherche et en allocations de moyens destinés aux chercheurs et unités de recherche publiques ou privées. Les acteurs de la programmation sont les agences et organismes nationaux. Pour dynamiser et structurer le considérable potentiel de recherche universitaire, il est essentiel que cette programmation soit étroitement coordonnée au niveau

⁴⁸ Rapport MESR DGRI, Périmètre et fonctions de l'Institut National des Sciences Mathématiques et de leurs Interactions, novembre 2008.

⁴⁹ Rapport au MESR du Comité IST Information Scientifique et Technique, J. Salençon, A. Moatti, Mai 2008.

national autour d'une vision partagée et d'une stratégie lisible. Pour décliner la stratégie nationale du domaine, un comité de coordination national sera mis en place autour des trois acteurs jouant le rôle d'agences de moyens pour ces disciplines, CNRS, INRIA et ANR. L'articulation de ce comité avec les instances consultatives des trois établissements devra être précisée. La définition de la programmation se fera en concertation avec les autres acteurs de la recherche et notamment les universités qui ont vocation à constituer le cœur du système de recherche, l'Institut Telecom et le CEA qui, avec l'INRIA, ont démontré leurs compétences en matière de transfert technologique dans le domaine.

3.2.3 Institut de recherche pour les Sciences et Technologies de l'Information

La superposition actuelle de deux organismes, CNRS et INRIA, impliqués sur les mêmes thèmes et sur le même terrain n'est pas optimale en termes d'allocation des moyens, nuit à la programmation et peut ainsi se révéler contre productive. Un groupe de travail présidé par Guy Cousineau a conduit une analyse sur les rôles respectifs des deux organismes et de leurs relations aux universités et a conclu à la nécessité « *d'un institut unique centré sur les sciences et technologies de l'information en couvrant tout le champ de la connaissance depuis la théorie jusqu'aux applications* »⁵⁰. Il est fortement souhaitable qu'un institut des sciences et technologies de l'information voit le jour au sein du CNRS pour rendre possible la coordination nationale évoquée plus haut.

3.2.4 Grands défis

Une modalité originale pour la recherche par projet, expérimentée par l'ANR depuis 2008, est celle des compétitions organisées entre projets sur un grand défi scientifique, technique ou sociétal. Les compétitions internationales telles que les concours de robots, les défis en fouille de texte, en analyse d'images, ou encore le défi DARPA de véhicule autonome, sont des moteurs de progrès sur des sujets pointus, qui mobilisent fortement les communautés concernées. L'ANR a ainsi lancé trois défis : un en 2008 sur la sécurité d'un système d'exploitation pour l'internaute, deux en 2009, sur la sécurité d'un système embarqué et sur l'exploration de territoire inconnu par des robots. Il convient d'amplifier cette démarche.

3.2.5 Calcul intensif, Europe

En raison du rôle transverse de la simulation, la maîtrise d'ouvrage des activités de calcul intensif a été confiée à la société GENCI précédemment citée. Ce rôle doit être poursuivi, les efforts pour faire de la France un des premiers pays hôtes de l'infrastructure européenne de calcul intensif (projet PRACE) doivent être poursuivis.

Enfin, il est important que les priorités nationales de la France soient mieux prises en compte au niveau européen. Cela exige un positionnement approprié au sein des différentes instances de programmation du PCRDT mais également avec l'Institut européen de technologie (IET) et l'*European Research Council (ERC)*, etc.

⁵⁰ Rapport Cousineau, remis à la ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche, novembre 2008.

3.3 Créer les conditions d'un changement d'intensité dans l'innovation

3.3.1 Les formations, éléments clés de l'innovation

Les sciences du domaine sont partie intégrante de la culture générale et de la culture scientifique, ce qui doit se refléter à tous les niveaux de formation, depuis l'alphabétisation numérique jusqu'aux scientifiques de haut rang : *une politique éducative doit être engagée dès à présent* si l'on veut former non seulement les ingénieurs et les chercheurs de demain mais aussi les futurs citoyens et utilisateurs des technologies. De nombreux pays se sont engagés résolument sur cette voie, comme la Chine et l'Inde avec les effets que l'on connaît. La situation en France est notoirement insuffisante et il faut palier le déficit d'image des métiers des mathématiques et de l'informatique auprès du public et des jeunes.

Dès les cycles primaire et secondaire, un enseignement d'informatique doit viser l'acquisition de bases solides en matière de programmation et d'algorithmique, de représentations numériques des textes, des images et des sons, d'architecture des machines, de réseaux, de bases de données, etc. Pour être efficaces, ces cursus doivent développer la continuité du raisonnement depuis la conception de l'expression algorithmique jusqu'à sa réalisation effective et prendre au lycée la forme d'une discipline scolaire en tant que telle⁵¹. L'acquisition de ce socle de base pourrait ensuite attirer les meilleurs étudiants vers ces disciplines et pourrait éviter également que les filles ne se détournent de ce type d'études par méconnaissance de la réalité du domaine.

Un enseignement scientifique de haut niveau en matière de sciences du numérique et de mathématiques contemporaines⁵² doit être développé dans toutes les filières de formation produisant des cadres scientifiques ou techniques, pour les entreprises comme pour les administrations : il doit trouver une place en rapport avec les enjeux économiques du domaine et rendre l'environnement économique et administratif favorable à l'innovation du secteur. Ceci pourrait permettre aussi aux chercheurs d'autres disciplines d'utiliser efficacement l'outil qu'est pour eux l'ordinateur. Des questions de haut niveau quant à l'architecture et la correction des logiciels et des systèmes, des processus de conception et d'ingénierie doivent être développées pleinement en tirant profit de la disponibilité de logiciels libres de qualité industrielle et de la possibilité que cela offre⁵³ de faire participer les étudiants à des projets grandeur nature. De la même manière, des formations en techniques de modélisation et calcul doivent être proposées et généralisées dans différents cycles d'enseignement.

3.3.2 Le processus d'innovation

Les sciences du numérique produisent des outils et des technologies favorisant le processus d'innovation dans tous les secteurs, comme le travail collaboratif, la partage de connaissances, le cycle modélisation / simulation / expérimentation, etc. Pouvoir innover relève d'un continuum recherche fondamentale / expérimentation et implique un recours rapide aux « preuves du concept » ainsi qu'aux « preuves de l'usage ». Pour le permettre, il faut accroître la culture de l'entrepreneuriat et de la propriété intellectuelle parmi les acteurs et renforcer les mécanismes et dispositifs favorisant l'innovation et le transfert :

⁵¹ Voir sur ce sujet le site du groupe de travail ITIC de l'ASTI : <http://asti.ibisc.univ-evry.fr/groupe-itic/> ainsi que <http://www.france2025.fr/xwiki/bin/view/France2025/LenseignementdelinformatiqueetdesTIC>.

⁵² Les mathématiques enseignées dans les classes préparatoires datent du 19^{ème} siècle.

⁵³ Cf. David A. Patterson, « Computer Science Education in the 21st Century », Communications ACM, Mars 2006.

- en encourageant le développement des relations entre industriels et chercheurs en vue d'une « fertilisation réciproque », par des mécanismes variés et souples, parmi lesquels le dispositif Carnot,
- en maintenant un bon équilibre entre projets partenariaux ouverts et collaborations bilatérales industrie / recherche, favorisant la continuité des collaborations autour d'objectifs stratégiques et long terme,
- en prenant en compte l'existence d'une innovation qui sait transformer astucieusement des concepts de recherche éventuellement réalisés par d'autres,
- en renforçant les lieux intégrant la formation et les différents types de recherche. La mise en place de pôles régionaux doit faciliter ce rapprochement en créant la masse critique et les synergies nécessaires,
- en favorisant la création et le développement d'entreprises comme outils de transfert des résultats de la recherche⁵⁴. Les nouveaux modèles économiques basés sur le logiciel libre peuvent, en simplifiant la problématique de la propriété industrielle et en nécessitant des investissements généralement moins élevés, être un facilitateur important.

Une revue complète du continuum amont-aval devra être lancée pour étudier ces questions et faire des propositions.

⁵⁴ Cf. Laurent Kott, Inria Transfert, La dynamique de la valorisation, communication au groupe SNRI NCM, février 2009.

ANNEXE - COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL

Animateur du groupe :

Joseph SIFAKIS, Directeur de recherche, CNRS et université de Grenoble

Membres du groupe :

Gérard BERRY, directeur scientifique, ESTEREL TECHNOLOGIES

Anne BLONDEL, directrice de la stratégie, UBISOFT

François BOURDONCLE, président directeur général, EXALEAD

Alain BRAVO, président, SUPELEC

Bertrand BRAUNSCHWEIG, chef du département STIC, Agence nationale de la recherche (ANR)

Riadh CAMMOUN, directeur, CEA / LIST

Mireille CAMPANA, ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi

Brigitte CARDINAEL, Responsable du pilotage de la Recherche Partenariale, France-TELECOM

Bruno CARRIAS, Délégué général du SYNTEC, président d'AXONES

Isabelle DE LAMBERTERIE, DR, CNRS

Christophe DESSAUX, ministère de la Culture et de la Communication

Roberto Di COSMO, professeur, université Paris VII

Véronique DONZEAU GOUGE, DSA, CNRS

Bernard DUBUISSON, ministère de la défense

Philippe FLAJOLET, directeur de recherche, INRIA

Benoit FORET, DGRI ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche

Thierry FUNCK-BRENTANO, directeur des relations humaines et de la communication, LAGARDERE

Jean-Marc GAMBAUDO, DSA, CNRS

Malik GHALLAB, délégué général, INRIA RTI

Oskar GUILBERT, président-directeur général, DONTNOD ENTERTAINMENT

Jean-François HAMELIN, directeur Systèmes d'Information, EDF

Francis JUTAND, directeur scientifique, Institut Telecom

Laurent KOTT, directeur général, INRIA Transfert

Jean-François LACRONIQUE, président, Fondation sante et radiofréquences

Véronique LAMBLIN, directeur d'études, FUTURIBLES

Stéphane MALLAT, président-directeur général, LET IT WAVE

Guy METIVIER, professeur, université de Bordeaux AS

Chahab NASTAR, directeur scientifique, SAP Business Objects

Olivier PIRONNEAU, professeur, CSCI

Catherine RIVIERE, président-directeur général, GENCI

Gérard ROUCAIROL, directeur scientifique, BULL

Marie-Christine ROUSSET, professeur, université de Grenoble

Brigitte ROZOY, DGRI ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche

Christiane SCHWARTZ, présidente du pôle Images et réseaux, Images et réseaux

Bernard STIEGLER, professeur, UTC Compiègne

Alex TURK, président, CNIL (commission nationale de l'informatique et des libertés)

Dominique VERNAY, directeur technique, THALES

Jean-Christophe YOCCOZ, professeur, ENS