

Etude de l'impact socio-économique des Mathématiques en France

Les Mathématiques, un atout essentiel pour
relever les défis de demain : connaissance,
innovation, compétitivité



Mai 2015





Etude réalisée par CMI (Nicolas Kandel, Julie Koeltz, Flore Guyon, Romain Girard, Delphine Bartolini) à la demande d'AMIES, en partenariat avec la FSMP et la FMJH et le soutien des Labex Archimède, Bézout, Carmin, CEMPI, CIMI, IRMIA, Lebesgue, LMH (FMJH), Milyon, PERSYVAL-Lab, SMP (FSMP).



DÉNOUER LES PROBLÉMATIQUES COMPLEXES EST UN ART





SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	5
RESUME.....	9
PARTIE 1 - PANORAMA DE LA RECHERCHE ET DE LA FORMATION EN MATHEMATIQUES	11
1. UNE RECHERCHE D'EXCELLENCE, MAIS INDIRECTEMENT REPRESENTEE DANS LES GRANDS PROGRAMMES NATIONAUX ET EUROPEENS	11
2. UNE RELATION RECHERCHE-INDUSTRIE QUI MANQUE ENCORE DE STRUCTURATION	13
3. UNE PLACE SIGNIFICATIVE DES ENSEIGNEMENTS EN ET PAR LES MATHEMATIQUES DANS LE PAYSAGE DES FORMATIONS INITIALES	16
4. UN NIVEAU D'INSERTION PROFESSIONNELLE ELEVE POUR LES ETUDIANTS FORMES EN ET PAR LES MATHEMATIQUES	19
PARTIE 2 - IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES DES MATHEMATIQUES.....	21
1. UN POIDS SIGNIFICATIF DES EMPLOIS IMPACTES PAR LES MATHEMATIQUES EN FRANCE.....	21
2. UNE CONTRIBUTION AU PRODUIT INTERIEUR BRUT DE L'ORDRE DE 15%.....	23
3. QUELS SECTEURS SONT LES PLUS CONTRIBUTEURS ?	23
PARTIE 3 - CONTRIBUTION ET DIFFUSION DES MATHEMATIQUES.....	27
1. LES MATHEMATIQUES AVANCEES : MOTEUR DE L'INNOVATION DANS DES CHAMPS D'APPLICATION TOUJOURS PLUS NOMBREUX.....	27
2. LES COMPETENCES MATHEMATIQUES SONT INTEGREES SUR L'ENSEMBLE DE LA CHAINE DE VALEUR DES ENTREPRISES	33
3. LA MOBILISATION DES COMPETENCES MATHEMATIQUES FAIT L'OBJET D'UNE ATTENTION CROISSANTE MAIS EST ENCORE PEU SUIVIE.....	38
4. L'APPEL A LA RECHERCHE PUBLIQUE : UNE AUTRE VOIE PRIVILEGIEE POUR LA MOBILISATION DE COMPETENCES MATHEMATIQUES AVANCEES	40
PARTIE 4 – CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES POUR RELEVER LES DEFIS DE DEMAIN EN S'APPUYANT SUR LES MATHEMATIQUES.....	41
ANNEXES.....	45



INTRODUCTION

Si l'excellence de la recherche mathématique française est mondialement reconnue, son interaction avec le monde industriel est encore peu lisible.

Pourtant, l'industrie et le monde de l'entreprise regorgent de mathématiques plus ou moins explicites (modèles, statistiques, algorithmes, simulation numérique, optimisation, etc.).

« Les domaines qui mobilisent les mathématiques avancées sont aujourd'hui considérablement plus nombreux qu'il y a vingt ans. Ils sont aussi plus stratégiques. (...) Nous voyons aujourd'hui apparaître de nouveaux métiers et de nouveaux modèles économiques, dans lesquels les statistiques et le traitement des données jouent un rôle important. La collecte, la structuration, la transformation et l'exploitation des données collectées passent par des processus mathématiques de très haut niveau. (...) Dans le nouveau paradigme, marqué par la continuité entre mathématiques fondamentales et appliquées et par la présence des mathématiques fondamentales au cœur du monde économique, la question de la communication est centrale. »

Jean-Pierre Bourguignon, Président du Conseil européen de la recherche, « Un nouvel âge d'or pour les Mathématiques en entreprise ? » (2014)

Cette tendance a d'ailleurs été étayée par un ensemble de réflexions menées depuis quelques années par les communautés mathématiques du monde entier, notamment en France sous l'impulsion des sociétés savantes¹, mais également en Europe² et aux Etats-Unis³, ou encore en Australie⁴ et au Canada⁵.

Récemment, des rapports ont fait état des impacts très significatifs des mathématiques en termes d'emploi et de valeur ajoutée. Une étude sur le Royaume-Uni⁶ estime à 2,8 millions le nombre d'emplois qui utilisent des compétences mathématiques, soit 9% de l'emploi total, et à 208 milliards de livres leur contribution à la valeur ajoutée, soit 16% du Produit Intérieur Brut (PIB).

Dans ce contexte, l'Agence pour les mathématiques en interaction avec l'entreprise et la société (AMIES), en partenariat avec la Fondation Sciences Mathématiques de Paris (FSMP) et la Fondation Mathématique Jacques Hadamard (FMJH) et en association avec les Labex de mathématiques, a confié au cabinet de conseil en stratégie CMI **l'étude de l'impact socio-économique des mathématiques en France**. Cette étude, qui a été conduite de janvier à mai 2015, vise trois objectifs principaux :

- Mesurer l'impact socio-économique des mathématiques en France et mettre en évidence la contribution économique actuelle des mathématiques au

¹ ARP, Enquête sur les mathématiques au cœur de l'innovation industrielle (2008), SMAI - Rapport de prospective sur les mathématiques appliquées et industrielles (2008)

² ESF, Forward Look on Mathematics and Industry (2011)

³ SIAM, Report on Mathematics in Industry (2012)

⁴ Australian Academy of Science, The importance of advanced physical and mathematical sciences to the Australian economy (2015)

⁵ Some Assembly Required : STEM Skills and Canada's Economic Productivity, The Expert Panel on STEM Skills for the Future, Council of Canadian Academies, 2015

⁶ Deloitte, Measuring the Economic Benefits of Mathematical Science Research in the UK (2010)



développement industriel et à l'innovation – l'impact socio-économique étant entendu à la fois comme l'impact direct (volume d'emplois, part du PIB sectoriel et global) et indirect (développements technologiques majeurs facilités par l'appui sur des compétences mathématiques) ;

- Analyser les liens entre entreprises et expertises en mathématiques pour éclairer les responsables des programmes de recherche et du management dans les entreprises dans leurs stratégies de développement et d'intégration des compétences mathématiques ;
- Préciser les domaines thématiques ainsi que les outils qui devraient être développés pour une meilleure synergie entre mathématiques et entreprises.

Les résultats de cette étude font état d'un **caractère particulièrement diffusant des mathématiques** ; celles-ci constituent un champ de recherche, d'apprentissage et de connaissances qui sert de socle pour le développement des compétences de base, mobilisées dans de très nombreux métiers et des compétences de pointe en mathématiques avancées⁷ pour résoudre des problématiques de plus en plus complexes.

On constate aujourd'hui une grande transversalité de l'apport des mathématiques, tout comme leur importance croissante pour résoudre des problématiques industrielles. On peut citer :

- La nécessité d'appréhender des systèmes complexes, voire des systèmes de systèmes qui doivent interagir entre eux ;
- La nécessité de raisonner à plusieurs échelles distinctes (ex : échelle moléculaire et échelle systémique) ;
- La gestion des incertitudes.

Néanmoins, **toutes les problématiques sur lesquelles sont mobilisées les mathématiques ne sont pas résolues par elles seules**. Les résultats de cette étude soulignent des interactions très fortes, et qui ont tendance à s'accroître, entre les mathématiques et d'autres disciplines : informatique, physique, mécanique, automatique, chimie, sciences du vivant, sciences sociales, etc. Des liens étroits sont établis entre progrès en mathématiques et progrès dans les autres champs académiques et ce sont ces interactions entre disciplines en évolution qui font des mathématiques une « *key enabling technology* » (technologie clé générique).

Si l'on se réfère à la définition donnée par la commission européenne des technologies clés génériques, les mathématiques, en interaction avec d'autres disciplines, semblent en effet en présenter les caractéristiques :

- *Elles sont intensives en connaissances et en investissement*
- *Elles s'appuient sur un haut niveau de recherche et développement*
- *Elles génèrent des cycles rapides et intégrés d'innovation*
- *Elles génèrent de l'emploi hautement qualifié*

⁷ Les mathématiques avancées sont entendues ici comme les mathématiques mobilisant la recherche en mathématiques et des outils issus de la recherche.



Leur influence est omniprésente, permettant des innovations de processus, de produits et de services dans toute l'économie. Elles s'inscrivent dans une approche systémique, pluridisciplinaire et trans-sectorielle, diffusant dans de nombreux domaines technologiques.

L'ensemble de ces résultats est détaillé dans le présent document qui est articulé de la manière suivante :

- Une première partie, « Panorama de la recherche et de la formation en mathématiques », délimite le périmètre des mathématiques en recherche, décrit ses relations avec le monde socio-économique et précise la place des mathématiques dans la formation.
- Une deuxième partie, « Quantification des impacts socio-économiques des mathématiques », dresse la liste des métiers mobilisant des compétences en mathématiques, ainsi que leur poids dans l'économie française afin d'en déduire l'impact des mathématiques en termes d'emploi et de valeur ajoutée par secteur et dans le Produit Intérieur Brut français.
- Une troisième partie, « Contribution et diffusion des mathématiques », expose les compétences apportées par les mathématiques, qui sont stratégiques pour le développement des entreprises, les vecteurs de leur diffusion et leur mode d'intégration.

Notre méthodologie est fondée sur un travail d'analyse documentaire extensif, la conduite d'entretien auprès de plus de quarante chercheurs, industriels et experts et un travail d'analyse de données statistiques produites par l'INSEE⁸, pour la quantification de l'impact socio-économique des mathématiques. Sur ce point, nous avons identifié les professions directement impactées par les mathématiques (formation en ou par les mathématiques, production et application d'outils ou de recherches en mathématiques), nous avons attribué ces professions dans les différents secteurs économiques et nous avons appliqué un modèle Input-Output pour calculer l'emploi et la valeur ajoutée attribuables à la mobilisation des mathématiques.

⁸ Données 2012. L'attribution des professions impactées par les mathématiques dans les différents secteurs économiques s'est fait en croisant les 415 postes/professions recensés par l'INSEE au sein des Professions et Catégories Socioprofessionnelles de référence (PCS) croisées avec 615 secteurs d'activités recensés au sein des Nomenclature d'activités française (NAF)





RESUME

L'étude met en avant un impact très fort et en croissance des mathématiques pour la compétitivité et la croissance de l'économie française :

- *Les emplois impactés par les mathématiques sont à forte valeur ajoutée (15 % du PIB et 9 % des emplois) et en nombre croissant (+0,9% par an de 2009 à 2012 vs +0,5 % pour l'ensemble des emplois)*
- *Il apparaît que 44% des technologies clés, identifiées comme telles par les rapports gouvernementaux, sont fortement impactées par les progrès en mathématiques,*
- *La mobilisation de 5 grands champs de compétences mathématiques (le traitement du signal et l'analyse d'images, le data mining, la Modélisation-Simulation-Optimisation (MSO), le High Performance Computing (HPC), la sécurité des systèmes d'informations et la cryptographie) sera croissante dans de nombreux secteurs d'activité, en particulier l'énergie, la santé ou encore l'industrie et les télécommunications.*

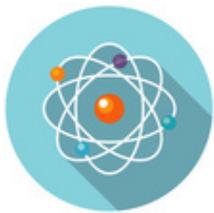
L'employabilité des étudiants en mathématiques est excellente ; les entreprises (les grandes mais aussi les PME) prennent d'ailleurs progressivement conscience de cet impact mais sont encore peu organisées pour gérer en leur sein une expertise mathématique.

L'étude souligne enfin la nécessité de renforcer les liens entre le dispositif d'enseignement supérieur et les entreprises, en particulier pour la partie universitaire :

- *Lisibilité encore trop faible du dispositif d'enseignement supérieur et de recherche*
- *Attractivité insuffisante des carrières en entreprises pour les docteurs*
- *Initiatives de soutien en expertise mathématiques à renforcer pour les PME*

C'est en cherchant à corriger ces points de faiblesse que l'excellence scientifique française en mathématiques pourra véritablement constituer un avantage concurrentiel pour notre économie.

CHIFFRES CLES



4 000 chercheurs et enseignants-chercheurs

500 docteurs par an

60 laboratoires principaux dont 42 laboratoires de l'INSMI



25% des effectifs étudiants de niveau Bac+2 à Bac+8 sont formés en ou par les mathématiques

2,1 millions d'étudiants formés en activité en 2015

8,5% de la population active



37 technologies clés sur 85 sont impactées par les mathématiques

Dont 11 très fortement impactées

Simulation moléculaire
Énergie nucléaire
Réseaux électriques intelligents
Technologies d'exploration et de production d'hydrocarbures
Ingénierie génomique
Calcul intensif

Technologies pour l'imagerie du vivant
Ingénierie de systèmes complexes et systèmes de systèmes
Progressive/Intelligent Manufacturing
Sécurité holistique
Communications et données



3,8 millions de postes impactés par les mathématiques, **2,4 millions d'emplois, soit 9%** de l'emploi

285 Mds€ de valeur ajoutée **15%** du PIB

Top 5 des secteurs les plus impactés par les mathématiques (poids des emplois liés aux mathématiques par secteur)



Services IT : **75%**



R&D scientifique : **62%**



Production et distribution d'électricité et de gaz : **57%**



Extraction d'hydrocarbures : **56%**



Fabrication de produits électroniques : **54%**

56% de l'emploi impacté par les mathématiques est concentré sur 3 régions : Ile-de-France, Rhône-Alpes et Provence-Alpes-Côte d'Azur

15 secteurs parmi le top 20 des secteurs les plus impactés par les mathématiques ont une croissance supérieure à celle du PIB français.



PARTIE 1 - PANORAMA DE LA RECHERCHE ET DE LA FORMATION EN MATHÉMATIQUES

Au-delà du poids et de la qualité de la discipline portée par 4 000 chercheurs et enseignants-chercheurs en mathématiques et de la valorisation de leurs résultats dans l'économie, l'impact socio-économique des mathématiques en France peut s'apprécier par l'importance des mathématiques en tant que discipline de formation au sein de formations spécialisées en Mathématiques et au sein d'un large champ de formations avec les Mathématiques comme discipline secondaire.

1. Une recherche d'excellence, mais indirectement représentée dans les grands programmes nationaux et européens

La qualité de la recherche française en Mathématiques fondamentales et appliquées est mondialement reconnue. La France y est particulièrement performante, dans l'absolu et relativement au poids de la discipline au niveau national

On recense aujourd'hui 4 000 chercheurs et enseignants-chercheurs en mathématiques⁹ travaillant dans plus de 60 grands laboratoires au niveau national, dont les travaux sont mondialement reconnus.

En matière bibliométrique, la recherche française se classe au **troisième rang mondial** en 2012, avec 8,5% des publications en mathématiques les plus citées à 2 ans¹⁰ dans le monde (top 10%). Elle se place derrière les Etats-Unis (27,3%) et la Chine (20,5%) mais devant l'Allemagne, l'Italie et le Royaume-Uni (entre 5,8% et 7,6%). Son positionnement est **en recul par rapport à 2002**, année où la France se classait au 2^e rang mondial avec une part de 11,2%.

Le poids des mathématiques dans l'ensemble des publications françaises est de 7%, loin derrière d'autres disciplines relevant des sciences dures, qui pèsent entre 10 et 14% de la production française¹¹. Pour autant, les mathématiques sont au 3^{ème} rang des disciplines françaises pour leur part des publications en mathématiques les plus citées à 2 ans dans le monde (top 10%), derrière les Sciences de l'Univers (11,2%) et la Physique (9%).

Les grandes disciplines de recherche en mathématiques

- Logique et fondations
- Théorie des nombres et géométrie arithmétique
- Géométrie algébrique
- Algèbre
- Topologie algébrique et géométrie
- Géométrie
- Analyse et systèmes dynamiques
- Équations aux dérivées partielles
- Probabilités et statistique
- Histoire des mathématiques
- Modélisation et calcul

Classification INSMI

⁹ Effectifs enseignants-chercheurs et chercheurs relevant de l'INSMI principalement et d'autres Instituts du CNRS, d'Inria et des universités françaises.

¹⁰ Même si cet indicateur n'est pas favorable à la mesure de la qualité de la production mathématique, combiné aux indicateurs liés au niveau d'internationalisation des publications, au nombre de médailles obtenues par la communauté française, il permet de positionner la France au sein des leaders internationaux de la discipline.

¹¹ Publications impliquant au moins un chercheur français. Source OST.



Avec **près de la moitié de ses publications en mathématiques en collaboration internationale**¹² (48,2%), la France est devant les Etats-Unis (38,1%) et la Chine (22,3%). Chaque année, le Centre international de rencontres mathématiques¹³ à Marseille et l'Institut Henri Poincaré accueillent 12 000 chercheurs internationaux.

En nombre de médailles, la France est au **deuxième rang mondial** en recherche mathématique. Depuis 1936, la France totalise 13¹⁴ médailles Fields contre 14 pour les États-Unis, 9 pour la Russie, 6 pour le Royaume-Uni, 3 pour le Japon, 2 pour la Belgique ou encore 1 pour la Chine. Les mathématiciens français ont également reçu de nombreux autres prix prestigieux comme le prix Wolf de mathématiques (6), le prix Henri Poincaré (4), ou encore le prix Abel (3).

16 universités françaises se classent parmi les 200 premières en mathématiques au niveau international (classement de Shanghai de 2014) dont 2 dans le top 10 : l'Université Pierre et Marie Curie (4^{ème}) et l'Université Paris-Sud (7^{ème}). Le podium est complété par les Etats-Unis (59 universités dans les 200 premières) et la Chine (36).

Cette force de recherche s'exprime par ailleurs fortement dans ses interactions avec d'autres disciplines. Un mathématicien sur cinq (périmètre INSMI) interagit avec des chercheurs d'une autre discipline¹⁵. De même, dans le périmètre d'Inria, des équipes pluridisciplinaires associent mathématiciens (avec, pour une forte proportion d'entre eux, une double compétence en mathématiques et informatique) et informaticiens au sein de projets portant sur les mathématiques appliquées, le calcul et la simulation, l'algorithmique, la programmation, les logiciels et les architectures.

Les mathématiques sont en interaction croissante en particulier dans les domaines suivants :

- **Informatique** : théorie des langages, automates, théorie des graphes, combinatoire, complexité et géométrie algorithmiques, calcul scientifique, programmation, développement logiciel, cryptographie, traitement d'image ;
- **Mécanique-ingénierie-géosciences** : mécanique des fluides / des solides, sciences de l'ingénieur, industrie pétrolière ;
- **Physique-chimie-astronomie** : physique théorique / quantique / statistique / milieux dilués, dynamique moléculaire, acquisition de données ;
- **Sciences du vivant** : génomique, biologie cellulaire / animale / végétale, dynamique des populations, médecine-santé, écologie et biodiversité ;
- **Sciences humaines et sociales** : économie, finance, sociologie, psychologie, géographie.

¹² Publications associant un laboratoire français et un ou plusieurs laboratoires étrangers

¹³ <http://www.cirm-math.fr/>

¹⁴ Dont Alexandre Grothendieck, apatride, mais comptabilisé comme Français

¹⁵ INSMI-CNRS, Les interactions pluridisciplinaires des mathématiques, Rapport de P. Dehornoy et al. (2010)



Les Mathématiques ne sont en revanche qu'indirectement représentées au sein des grands programmes nationaux et européens, à la différence d'autres pays de référence comme les États-Unis

Alors que la *European Science Foundation* soulignait en 2011 dans son *Forward Look « Mathematics and Industry »* que la recherche en mathématiques était fortement sous-représentée au sein des grands programmes de financement européens (programme H2020), les mathématiques y sont davantage présentes depuis 2014, par le biais du HPC notamment, à l'honneur dans de nombreux appels à projets. Il n'en demeure pas moins que les mathématiques en tant que telles ne sont pas représentées. Il en est de même pour les guichets nationaux, tels que l'Agence Nationale de la Recherche (en dehors des appels « Défis de tous les savoirs »). C'est dans leur interaction avec d'autres disciplines (Biologie Santé, Énergie, Ingénierie, Sciences et Technologies de l'information et de la communication) que les Mathématiques voient les opportunités de financement se concrétiser.

A l'inverse, la *Division of Mathematical Sciences (DMS)* de la *National Science Foundation* américaine flèche directement des programmes et des opportunités de financement vers les mathématiques.

2. Une relation recherche-industrie qui manque encore de structuration

Une grande diversité dans les modes et les secteurs de collaborations socio-économiques mais des relations contractuelles recherche-industrie qui restent, néanmoins, encore peu significatives.

On estime à environ 10% la proportion des chercheurs en mathématiques entretiennent des relations régulières avec les entreprises.

30 start-ups ont été créées au sein des laboratoires de l'INSMI et 120 start-ups par Inria en appui au moins partiel sur des compétences en mathématiques, sans tenir compte des entreprises créées au sein des écoles d'ingénieurs.

Ces collaborations prennent des formes diverses : projets de recherche partenariale, projets FUI et projets ANR collaboratifs (environ 28 projets ANR sur la période 2005-2014), chaires industrielles et laboratoires communs (7 ont été identifiés sur la communauté mathématique).

Elles concernent principalement les grands groupes de l'énergie / environnement, de l'aéronautique, du transport, du *manufacturing* / métallurgie ainsi que le CEA et la DGA.

La part des ressources contractuelles privées dans le budget consolidé d'un laboratoire oscille entre **1% et 5%** (une majorité des laboratoires identifiés comme étant proches des entreprises déclarent conclure 2 à 3 contrats industriels par an pour un flux moyen de 100K€ au total, ce qui reste assez limité). Par comparaison, on peut estimer à 4%¹⁶, la part des contrats de recherche passés avec des entreprises dans les ressources totales des opérateurs publics de recherche. Si plusieurs laboratoires de recherche en mathématiques dépassent ce seuil, la plupart d'entre eux reste en-deçà.

¹⁶ Projet de Loi de finance 2015. Extrait du bleu budgétaire de la mission : Recherche et enseignement supérieur



Cette proportion peut néanmoins presque doubler dans certains laboratoires universitaires ou dans les laboratoires rattachés aux écoles d'ingénieurs. Ces dernières peuvent souvent s'appuyer sur des chaires industrielles qui leur apportent en moyenne 1 M€ sur quatre ans.

Si on étend le périmètre des ressources contractuelles aux ressources mobilisées dans d'autres formes de collaborations (contrats ANR, FUI, chaires...), leur part peut atteindre 8% dans les laboratoires, et jusqu'à 25% du budget consolidé des laboratoires des grandes écoles.

La faiblesse de l'intensité des collaborations avec le secteur privé peut s'expliquer par plusieurs raisons :

- **Peu de laboratoires disposent de moyens humains** dédiés pour animer et entretenir les relations avec les entreprises. Ils s'appuient sur les services de valorisation des universités et des organismes (ils sont, pour certains, également sous-dotés en moyens humains) et/ou capitalisent sur les contacts privilégiés d'un chercheur avec une ou plusieurs entreprises.
- **Les communautés mathématiques semblent encore peu impliquées dans les écosystèmes régionaux d'innovation et du transfert** et en particulier au sein des pôles de compétitivité, dans le dialogue avec les Société d'Accélération du Transfert de Technologie (SATT) ou encore les Instituts Carnot. Des actions en sens dans le cadre d'AMIES ont été initiées et mériteraient d'être renforcées.
- On constate encore aujourd'hui une **valorisation limitée** par les instances nationales en charge de la gestion de la carrière des Enseignants-Chercheurs (CNU 25 et 26) **des travaux de recherche appliquée et de transfert**.
- Les collaborations avec le secteur privé sont également freinées par les **difficultés que rencontrent les PME à formuler leurs problématiques en termes mathématiques**. A contrario, les grands groupes disposent de moyens et ressources (centres de R&D) en mesure d'identifier et d'explicitier précisément leurs besoins. Les collaborations industrielles impliquent ainsi très majoritairement les grands groupes. Enfin, les PME sont d'autant moins enclines à s'engager dans un projet de recherche amont qu'elles supportent un risque plus grand lié à une visibilité de moins long terme sur le devenir de leurs activités.
- Un autre frein évoqué tant par les entreprises que par les laboratoires relève du **caractère très contraignant des appels à projets collaboratifs de type ANR, H2020 ou FUI** en raison de leur lourdeur administrative. L'obtention de financements exige un investissement considérable de la part de l'entreprise tant en termes de temps que de moyens humains, alors même que **les taux de succès connaissent une forte diminution**, les décourageant à s'engager dans un projet de recherche.
- Enfin, la communauté académique nationale reste assez éclatée et les **compétences** (académiques, technologiques et instrumentales) **mobilisables par les entreprises manquent de lisibilité**.

Des leviers pour renforcer le lien recherche-industrie liés notamment à la mise en réseau de la communauté au niveau national, à la mise en place de partenariats structurants avec les grands groupes ou au développement d'approches de valorisation et de transfert adaptées aux PME

Au-delà de leur implication croissante au sein de leurs écosystèmes d'innovation régionaux, afin de renforcer les liens avec l'industrie, les laboratoires de recherche en mathématiques



préconisent un travail de **mise en réseau au niveau national**. On peut souligner à cet égard, les Semaines d'Etude Maths Entreprises (AMIES), et l'organisation d'ateliers pluridisciplinaires réunissant laboratoires, entreprises et pôles de compétitivité (Fédération Charles Hermite).

Un autre levier résiderait dans le développement plus massif des **laboratoires communs** qui permettent d'établir des partenariats étroits entre laboratoires et industriels sur une période longue, propice aux thèses et à des recherches, moins dépendants du rythme des appels à projet, et seraient adossés à des financements plus élevés.

Il conviendrait également de construire une **offre de services adaptée aux besoins et aux impératifs des entreprises**, en proposant des démarches structurées de promotion de « l'offre technologique » ou en organisant une participation accrue des laboratoires de mathématiques à des Instituts Carnot ciblés.

A ce titre, plusieurs initiatives à forte visibilité - l'hôtel à projets Maimosine sur le site de Grenoble, HPC-PME autour d'Inria, Genci, BPI France, CEMOSIS sur le site de Strasbourg - visent à renforcer le lien recherche-industrie à l'échelle de communautés localisées et bien identifiées. Les facteurs clés de succès de ces initiatives résident dans l'affichage clair des compétences mobilisables, dans la plupart des cas dans une approche pluri-disciplinaire (mathématiques, informatique, génie industriel, automatique, etc.), dans un accompagnement formel de l'entreprise pour traduire un projet industriel en besoin de compétences mathématiques, dans la qualité de l'appui à « l'ingénierie du projet » pouvant aller jusqu'à son ingénierie financière, et dans une mise en relation avec les experts scientifiques pertinents.

Une initiative structurante pour rapprocher recherche et PME

La Maison de la modélisation et de la simulation (MaiMoSiNE) préfigure l'émergence de structures intermédiaires entre le public et le privé

- MaiMoSiNE fédère 5 laboratoires en Mathématiques, Informatique, Contrôle et automatique, Génie Industriel
- Elle met à la disposition des PME les compétences (équipes de recherche pluridisciplinaires / experts) et les outils de modélisation et simulation numériques (plateforme CIMENT), trop souvent difficiles d'accès, et pourtant nécessaires à la résolution de leurs problématiques industrielles.
- Les PME/PMI disposant rarement de mathématiciens dans leurs équipes, MaiMoSiNE les accompagne dans le montage de contrats de recherche partenariale en les aidant à définir leur problématique, les besoins mathématiques impliqués et en identifiant les experts ad hoc.
- Les atouts de MaiMoSiNE sont :
 - Son assise pluridisciplinaire
 - Sa proximité locale qui en fait un portail unique dans le monde académique du bassin grenoblois
 - Son fonctionnement en mode projet (timeline précise), à l'interface entre recherche et industrie
 - Son label : signe de reconnaissance de la qualité de son travail, des entreprises lui demandent une « validation » de leurs modèles



Chiffres clés

Projet lancé en 2011

Entre **10 et 12 collaborations** par an

Soit un contrat scientifique signé par mois, essentiellement avec des PME-PMI

~200K€ en 2014

Secteurs visés :

- *Nanotechnologies*
- *Capteurs*
- *Image*
- *Mécanique, électricité de force*
- *Pétrolier*
- *Production d'acier*
- *Logiciel*
- *Organisation et management*
- *Banque*



3. Une place significative des enseignements en et par les mathématiques dans le paysage des formations initiales

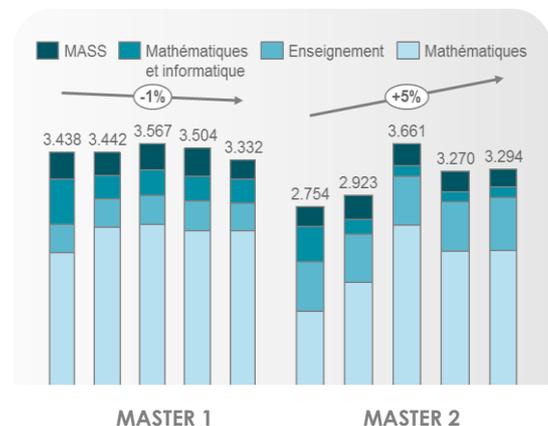
Transférer les compétences développées par la recherche en mathématiques vers le monde industriel présuppose la formation d'esprits capables de les assimiler et de les appliquer. Si les effectifs étudiants (Master et Doctorat) dont les Mathématiques sont la discipline principale sont stables et pèsent relativement peu (2,1% des étudiants inscrits en Master et 2,9% des effectifs des formations doctorales), environ 25% des effectifs étudiants inscrits en BTS, DUT, licence professionnelle, école d'ingénieurs, Master ou Doctorat sont formés en 2013 à la fois en mathématiques ou par les mathématiques¹⁷.

Lors de l'année scolaire 2012-2013, environ 6 600 **étudiants** étaient inscrits **en Masters dont les Mathématiques sont la discipline principale**, soit 2,1% des étudiants en Master à l'université¹⁸.

Sur les 275 **écoles doctorales** accréditées en 2014 par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche¹⁹, **43 sont habilitées à délivrer des Doctorats en Mathématiques**. En 2012-2013, elles comptaient dans leurs rangs près de **2 000 inscrits**, soit 2,9% des effectifs des formations doctorales. On recense près de **500 docteurs** diplômés par an en mathématiques.

Ces effectifs sont relativement limités et en faible évolution.

Graphique 1 : évolution du nombre d'étudiants inscrits en Masters 1 et Master 2 de mathématiques (2008-2013)



Les mathématiques ont en revanche un poids important dans d'autres formations des niveaux Bac+2 à Bac +8 : la formation par les mathématiques est très significative

Aux 6 600 étudiants de Master en Mathématiques viennent s'ajouter environ 7 780 étudiants formés par les mathématiques, inscrits dans l'un des 145 Masters universitaires d'autres disciplines, soit 2,6% des étudiants en Master à l'université. Il s'agit essentiellement des Masters d'enseignement d'autres disciplines scientifiques (56%), des Masters d'informatique (13%), de statistiques (6%) et d'économie (5%), en interaction avec les mathématiques.

Les mathématiques interviennent également dans les enseignements autres que strictement mathématiques des écoles doctorales, notamment en physique, sciences pour l'ingénieur ou encore dans les sciences et technologies de l'information et de la communication, sans qu'il soit possible d'estimer le nombre de doctorants impactés dans la mesure où la mobilisation de compétences mathématiques est très dépendante du sujet de thèse choisi.

¹⁷ La formation par les mathématiques est entendue ici comme la formation par des enseignements mobilisant significativement les mathématiques (plus de 4h hebdomadaires en moyenne sur toute la durée de la formation post-bac)

¹⁸ Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche (OpenData), Effectifs d'étudiants inscrits dans les établissements publics sous tutelle du ministère en charge de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (2015)

¹⁹ Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche (OpenData), Liste des écoles doctorales accréditées (2015)



21,1% des étudiants inscrits dans des formations courtes (niveau Bac+2 – Bac+3) mobilisent par ailleurs significativement les mathématiques.

- **56% des effectifs en DUT sont formés par les mathématiques**

Les enseignements mathématiques des 17 DUT avec des spécialités secondaires (disciplines scientifiques et techniques) varient entre 120 et 180h, auxquels s'ajoute éventuellement un volume correspondant à des modules complémentaires.

2 DUT avec des spécialités tertiaires ont également un programme dense en mathématiques : « Gestion logistique et transport » (GLT) avec 110h, et « Statistique et informatique décisionnelle » (STID) avec 120h de mathématiques, 565h de probabilités et statistiques, ainsi que des modules complémentaires²⁰. Ces formations regroupent **60 504 étudiants** en 2013.

- **10,4% des effectifs en BTS sont formés par les mathématiques**

Le volume horaire est strictement supérieur à 4h par semaine dans les BTS « Constructions métalliques », « Géomètre topographe » et « Services informatiques aux organisations »²¹ dispensés respectivement dans 20, 12 et 411 établissements. A raison de deux classes de niveau d'environ 30 élèves, on obtient un total de **26 580 étudiants**.

- **1,2% des effectifs en Licence Professionnelle sont formés par les mathématiques**

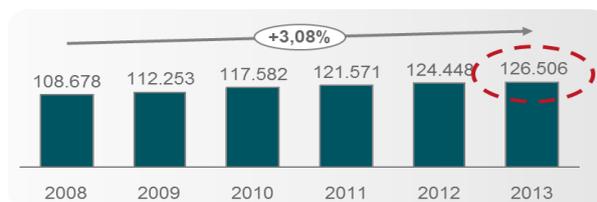
Il s'agit essentiellement de formations techniques en aménagement du territoire, statistiques, management des organisations, mécanique, production industrielle, santé et systèmes informatiques et logiciels²². Un total de **620 étudiants** est concerné.

En école d'ingénieurs, les mathématiques sont un enseignement de tronc commun significatif

Sur le total des cours, les mathématiques pèsent pour environ 16% des enseignements de première année, 10% des enseignements de deuxième année et 6% des enseignements de troisième année. Certains enseignements de spécialités (Stratégie et Finance, Mathématiques appliquées, etc.) sont composés à plus de 50% de cours de mathématiques. Les principaux champs d'enseignement en mathématiques concernent à 25% des outils mathématiques de base, à 25% le traitement du signal, à 19% les probabilités et statistiques, à 16% le calcul scientifique et à 12% les mathématiques discrètes et l'optimisation²³.

Les écoles d'ingénieurs comptent environ **125 000 étudiants** dans leurs rangs, tous niveaux confondus.

Graphique 2. Effectifs des 223 écoles d'ingénieurs accréditées par la CTI



²⁰ Conseil scientifique IREM, Les mathématiques en IUT (2010)

²¹ Direction générale pour l'enseignement supérieur et l'insertion professionnelle, Programme de mathématiques des brevets de technicien supérieur (2013)

²² www.iut.fr

²³ CNE, Rapport d'évaluation sur les formations supérieures en mathématiques orientées vers les applications (2002)

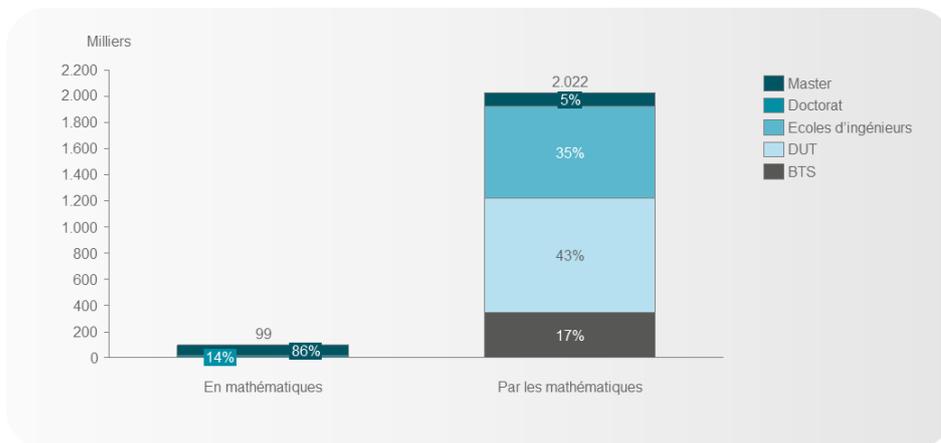


On peut estimer que 2,1 millions de personnes ont été formées par les mathématiques au cours des 35 dernières années et sont aujourd'hui en activité

Si l'on considère les diplômés des formations listées précédemment sur les 35 dernières années en tenant compte de l'évolution des effectifs²⁴ et des taux d'insertion professionnelle, on obtient **2,1 millions** de personnes formées en ou par les mathématiques qui seraient aujourd'hui en activité.

Ce total se décompose en deux ensembles : un **cœur de 99 000** personnes formées strictement en mathématiques (niveau Master et Doctorat) et un peu plus de 2 millions supplémentaires avec une formation par les mathématiques particulièrement significative (strictement plus de 4h par semaine en moyenne sur toute la durée de la formation post-bac).

Graphique 3. Nombre de formés en mathématiques et par les mathématiques en emploi



²⁴ Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, Repères et références statistiques sur les enseignements, la formation et la recherche (2014)



4. Un niveau d'insertion professionnelle élevé pour les étudiants formés en et par les mathématiques

Le taux d'insertion des diplômés de niveau Master en mathématiques est supérieur à la moyenne nationale. Il est également très favorable pour le Doctorat.

30 mois après leur diplôme, 96% des Masters mathématiques et 98% des Masters MASS – Mathématiques Appliquées et Sciences Sociales sont en emploi, contre 89% des Masters toutes disciplines confondues²⁵.

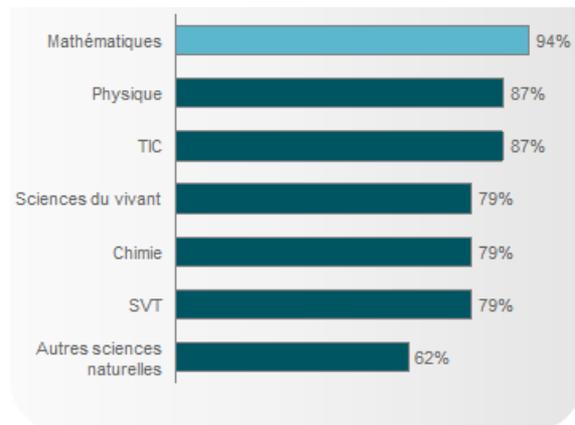
8 diplômés d'écoles d'ingénieurs sur 10 sont en emploi un an après leur diplôme, **94%** deux ans après²⁶.

Les **docteurs en mathématiques** sont les plus épargnés du chômage.

Seulement 6% des docteurs en mathématiques diplômés en Ile-de-France en 2013 sont en recherche d'emploi un an après l'obtention de leur Doctorat. La plupart avait même signé un contrat de travail avant la soutenance de la thèse (59%)²⁷.

Le taux de chômage des docteurs en mathématiques en France est plus faible que la moyenne (10%) des docteurs.

Graphique 4. Taux d'emploi des docteurs diplômés en IDF en 2013, un an après l'obtention de leur diplôme, par discipline



Les diplômés de Master en mathématiques travaillent le plus souvent dans le secteur privé et c'est la tendance inverse pour les docteurs. Ceci pose la question de l'attractivité des carrières privées pour les docteurs en Mathématiques mais aussi celle des débouchés pour les docteurs dans le secteur privé.

3 diplômés sur 4 d'un Master en mathématiques travaillent dans le secteur privé. 64% occupent des postes dans la fonction études, recherche et développement, principalement dans les études socio-économiques, la conception et la recherche et 17% travaillent dans l'informatique, en particulier dans l'information décisionnelle et de gestion.

En termes de secteur, ils travaillent principalement :

- dans les **services** : en finance, dans le secteur des banques et sociétés d'assurances (30%), dans des sociétés de service aux entreprises (cabinets de gestion et de conseil)
- dans **l'industrie** : dans des sociétés d'ingénierie (9%), en aéronautique, dans le BTP, en high tech, dans les industries de la santé.

²⁵ Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche (OpenData), Insertion professionnelle des diplômés de Master en universités et établissements assimilés - données nationales par discipline (2015)

²⁶ CDEFI, L'insertion professionnelle des ingénieurs diplômés en 2013 (2014)

²⁷ Adoc Talent Management, La poursuite de carrière des docteurs récemment diplômés en Île-de-France (2014)



L'autre quart intègre le secteur public. Ces docteurs travaillent dans l'enseignement et la formation (13%), dans la santé et l'action sociale (8%), ou encore dans l'administration publique²⁸.

S'agissant des **docteurs**, on peut estimer à **75%** la proportion des docteurs en mathématiques s'orientant vers le **secteur public** pour leur premier emploi, à des postes de recherche et d'enseignement (cette proportion est de 85% aux Etats-Unis avec une mobilité public-privé plus importante, puisque sur le total des diplômés d'un Doctorat entre 1990 et 2006, ce ne sont plus que 58,5%²⁹ qui travaillent dans le secteur public). **25%** des docteurs travaillent dans le secteur privé (17% en recherche et 8% dans un autre domaine).

Cela s'explique notamment par leurs aspirations puisqu'au moment de soutenir leur thèse, ils souhaitent pour 57% travailler dans la recherche publique (contre 49% pour l'ensemble des docteurs), 3% dans le public dans un domaine autre que la recherche (enseignement secondaire notamment), 18% dans la recherche en entreprise, 3% dans le privé dans un domaine autre que la recherche, 15% étaient indifférents³⁰.

Ceci pose la question de l'attractivité des carrières privées pour les docteurs en Mathématiques mais aussi celle des débouchés pour les docteurs dans le secteur privé.

L'attractivité des profils mathématiques n'en demeure pas moins indiscutable, de même que le caractère stratégique de leur compétence étant donnés les niveaux d'insertion professionnelle pour les gradés de Master ou de Doctorat.

²⁸ APEC, Quel job avec mon diplôme ? Mathématiques et mathématiques appliquées (2013)

²⁹ Titulaires d'un Doctorat en sciences naturelles cf. Careers of doctorate holders: employment and mobility patterns, OCDE (2010)

³⁰ Adoc Talent Management-AMIES, La poursuite de carrière des docteurs récemment diplômés en Île de France, Résultats pour les docteurs en Mathématiques (2015)

PARTIE 2 - IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES DES MATHÉMATIQUES

Les impacts socio-économiques des mathématiques peuvent être mesurés par le poids dans l'économie française des postes impactés par les mathématiques et par leur contribution à la création de valeur ajoutée. Il est également intéressant d'analyser où se concentrent les compétences mathématiques en termes de secteurs et de professions.

1. Un poids significatif des emplois impactés par les mathématiques en France

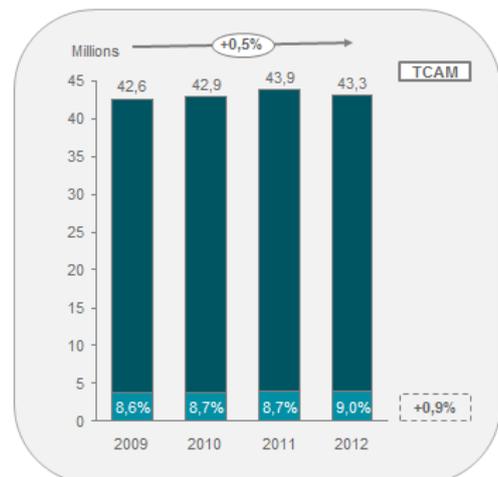
L'impact direct des mathématiques en France représente 9% des emplois soit 2,4 millions d'emplois.

Le nombre de postes³¹ impactés directement par les mathématiques en France s'élève à 3,8 millions sur 43,3 millions soit 9% du nombre total de postes³², tous secteurs d'activités confondus.

Ceci place la France à un niveau comparable à celui du Royaume-Uni avec **2,4 millions d'emplois impactés par les mathématiques** contre 2,8 millions au Royaume-Uni en 2010, soit **10% de l'emploi total**.

Ce poids est en constante progression depuis 2009 : le nombre de postes impactés directement par les mathématiques a augmenté plus vite que le nombre de postes total en France sur la période (0,9% en taux de croissance annuel moyen sur la période 2009-2012 pour les postes impactés par les mathématiques vs 0,5% pour l'ensemble des postes).

Graphique 5 : Evolution du poids des mathématiques dans l'emploi en nombre de postes – Taux de croissance annuel moyen (TCAM)



³¹ L'étude CMI a privilégié une analyse des nombres de postes impactés par les mathématiques comme donnée d'entrée (vs Deloitte en nombre de salariés). Un poste correspond à une profession occupée par un salarié dans un établissement. Le nombre de postes est ensuite traduit en nombre d'emplois.

³² Derniers chiffres disponibles auprès de l'INSEE (2012)



Une forte régionalisation des emplois impactés par les mathématiques et une concentration des emplois impactés par les mathématiques supérieure à la concentration de l'ensemble des emplois dans les 3 premières régions contributrices

Les emplois directement impactés par les mathématiques sont **concentrés en France métropolitaine**.

Les **trois régions les plus contributrices – Ile-de-France, Rhône-Alpes et Provence-Alpes-Côte d'Azur** -, tous emplois confondus, regroupent **56% des emplois impactés par les mathématiques**.

Le cumul de l'emploi impacté par les mathématiques dans ces régions est supérieur au cumul de l'emploi total (42,3%).

C'est en particulier le cas pour 3 des 5 régions du top 5 des régions concentrant le plus d'emplois impactés par les Mathématiques (Ile-de-France, Rhône-Alpes, Midi-Pyrénées) et en pour l'Ile de France spécifiquement, qui concentre 38,4% de l'emploi mathématique versus 24,5% de l'emploi total. Dans toutes les autres régions françaises, le poids des emplois impactés par les mathématiques est inférieur au poids de l'emploi total.

Graphique 6. Répartition des emplois directement impactés par les mathématiques en France métropolitaine (2012)



- Les 5 régions les plus contributrices sont :**
- **Ile de France : 38,4%** vs 24,5% de l'emploi total
 - **Rhône-Alpes : 11,3%** vs 10,5% de l'emploi total
 - **Provence-Alpes-Côte d'Azur : 6,3%** vs 7,3% de l'emploi total
 - **Pays de la Loire : 4,9%** vs 5,8% de l'emploi total
 - **Midi-Pyrénées : 4,7%** vs 4,4% de l'emploi total

Poids des emplois mathématiques pour l'ensemble des régions (ratio poids de l'emploi mathématique dans la région / poids de l'emploi total dans la région)
Île-de-France 156,73% ; Rhône-Alpes 107,62% ; Midi-Pyrénées, 106,82% ; Guyane 100,00% ; Provence-Alpes-Côte d'Azur 86,30% ; Alsace 84,62% ; Pays de la Loire 84,48% ; Haute-Normandie 84,00% ; Nord-Pas-de-Calais 81,48% ; Centre 81,08% ; Aquitaine 76,00% ; Bretagne 75,51% ; Franche-Comté 73,33% ; Lorraine 72,41% ; La Réunion 71,43% ; Languedoc-Roussillon 67,65% ; Guadeloupe 66,67% ; Corse 66,67% ; Picardie 65,22% ; Bourgogne 65,22% ; Auvergne 64,71% ; Poitou-Charentes 64,00% ; Champagne-Ardenne 61,11% ; Basse-Normandie 57,14% ; Limousin 55,56% ; Martinique 50%.

2. Une contribution au Produit Intérieur Brut de l'ordre de 15%

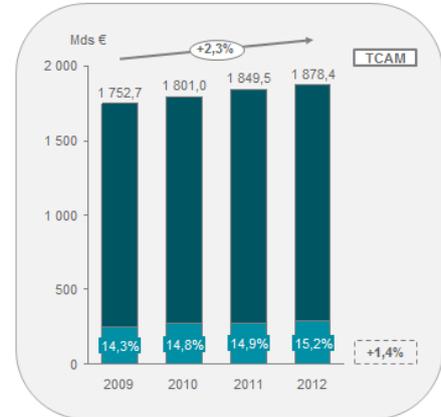
Les mathématiques contribuent à la création de valeur ajoutée en France à hauteur de 15% du PIB en 2012. Ce poids est en constante progression depuis 2009

La **valeur ajoutée apportée par les mathématiques en France** représente **285 milliards d'euros** sur 1 878 milliards d'euros³³. Elle représente **15% du PIB**.

Ce poids est en **constante progression depuis 2009**.

Il est très légèrement inférieur à celui constaté au Royaume-Uni, qui s'élève à 16% (278 Md€ rapportés à 1 807 Md€ en 2010) mais supérieur au poids des mathématiques dans le PIB néerlandais, estimé à 13%.

Les différences de poids des mathématiques dans l'emploi et le PIB entre la France et le Royaume-Uni s'expliquent essentiellement par la structure du Produit Intérieur Brut de chaque pays. Deux des secteurs les plus impactés par les mathématiques pèsent davantage dans le PIB britannique que dans le PIB français : le secteur Information et communication qui pèse pour 4,5% dans le PIB français contre 5,5% dans le PIB du Royaume-Uni et le secteur de la Finance et de l'Assurance qui pèse pour 3,8% dans le PIB français contre 7,7% dans le PIB du Royaume-Uni.³⁴



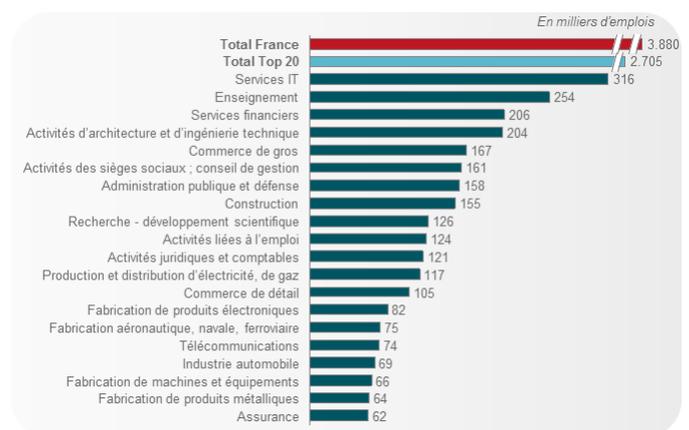
Graphique 7. Evolution de la contribution des mathématiques au Produit Intérieur Brut – Taux de croissance annuel moyen (TCAM)

3. Quels secteurs sont les plus contributeurs ?

Les 20 secteurs les plus contributeurs en termes d'emploi impacté par les mathématiques représentent 50% des postes en France (soit 21,8 millions) et 70% des postes impactés par les mathématiques (soit 2,7 millions).

Au sein de ces secteurs, les **professions les plus impactées par les mathématiques** sont :

- Des **ingénieurs** : IT (dont logiciel, etc.) principalement, de travaux, agro-alimentaires, technico-commerciaux (machines, etc.)
- Des cadres des **services financiers**
- Du personnel de **direction de la fonction publique**
- Des **ingénieurs et techniciens** (avec une qualification en mathématiques) pour les activités de travail temporaire ou liées à l'emploi.



Graphique 8. Top 20 des secteurs les plus impactés par les mathématiques en nombre de postes

³³ hors TVA, douanes et impôts, subventions

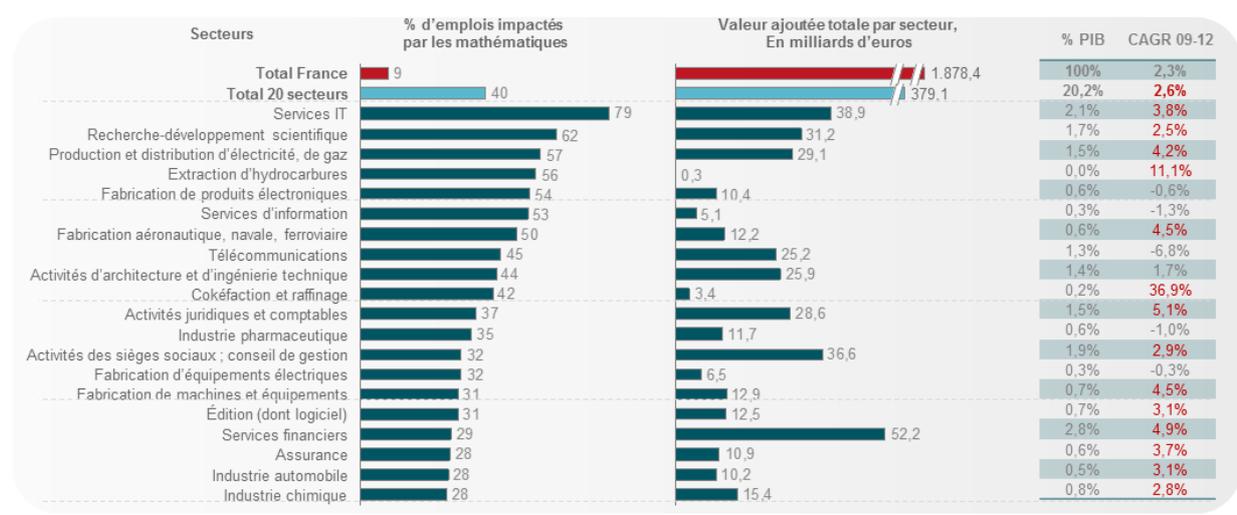
³⁴ Comparaisons faites pour les années de référence des deux études : 2010 pour l'étude Deloitte au Royaume-Uni, 2012 pour la France pour la présente étude.



Ces 20 secteurs tirent la croissance du PIB vers le haut : leur croissance, entre 2009 et 2012, est de 2,6% par an en moyenne contre 2,3% pour l'ensemble des secteurs sur la même période.

Plus spécifiquement, 15 des 20 secteurs les plus contributeurs ont une croissance significativement supérieure à celle du PIB. Cela concerne notamment les Services IT, l'énergie (électricité, hydrocarbures etc.), l'industrie (automobile, aéronautique, ferroviaire etc.), la banque, finance et assurance.

Graphique 9 : Top 20 des secteurs les plus impactés par les mathématiques en termes d'emplois (2012)

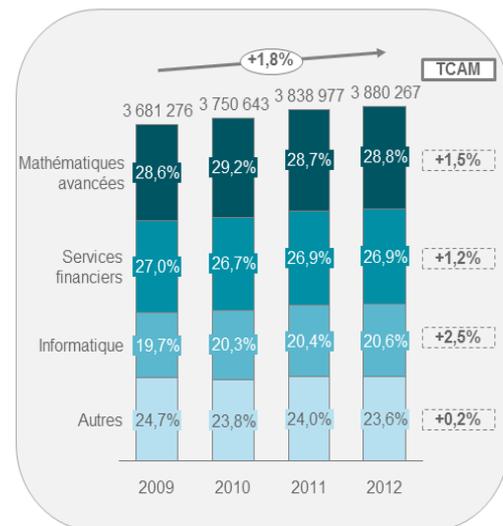


On estime que 30% des emplois mobilisant des mathématiques, en dehors des emplois liés à l'informatique et la finance, résultent de l'application directe des résultats de la recherche et des outils mathématiques

Nous avons affiné l'approche par profil, afin d'identifier les professions **directement impliquées dans la production et l'application de la recherche en sciences mathématiques et des outils mathématiques**, en dehors des postes du secteur informatique et de la finance.

Elles représentent **1,1 million de postes**, soit près de **30% des postes impactés par les mathématiques** et **2,6% de l'emploi total**. De plus, elles **tirent la croissance vers le haut** du nombre d'emplois directement impactés par les mathématiques, avec **+1,5% de taux de croissance annuel moyen** entre 2009 et 2012.

A noter également que les **emplois informatiques** bien que représentant une part inférieure (20% environ), voient leur **poids augmenter sur la période**, leur nombre étant en croissance de 2,5% par an en moyenne.



Graphique 10 : évolution de la répartition des postes directement impactés par les mathématiques, par catégorie



Le **top 5 des secteurs les plus contributeurs** en emploi impacté par **la production et l'application de la recherche en sciences mathématiques et des outils mathématiques** sont, dans l'ordre décroissant :

- Enseignement
- Recherche-développement scientifique
- Activités d'architecture et d'ingénierie ; activités de contrôle et analyses techniques
- Travaux de construction spécialisés
- Fabrication de matériel de transport

Ce sont dans ces secteurs que se concentrent les professions d'Enseignants et Enseignants-Chercheurs, d'Ingénieurs (hors secteur informatique), d'Ingénieurs en R&D, de Techniciens de R&D. Elles génèrent **79,8 milliards de valeur ajoutée**, soit près de **4,3% du PIB total**.



PARTIE 3 - CONTRIBUTION ET DIFFUSION DES MATHÉMATIQUES

Les mathématiques avancées contribuent au développement de technologies clés pour la compétitivité des entreprises et au développement économique de la France. Elles jouent par ailleurs un rôle fondamental dans la maîtrise par les industriels de systèmes de plus en plus complexes et la gestion de masse de données toujours plus importantes, en interaction avec d'autres disciplines, et notamment l'informatique. Leur maîtrise, par l'intégration d'ingénieurs et docteurs en mathématiques ou l'appel à la recherche, se révèle stratégique pour les entreprises et ce besoin devrait s'intensifier dans les années à venir pour exploiter de nouveaux potentiels.

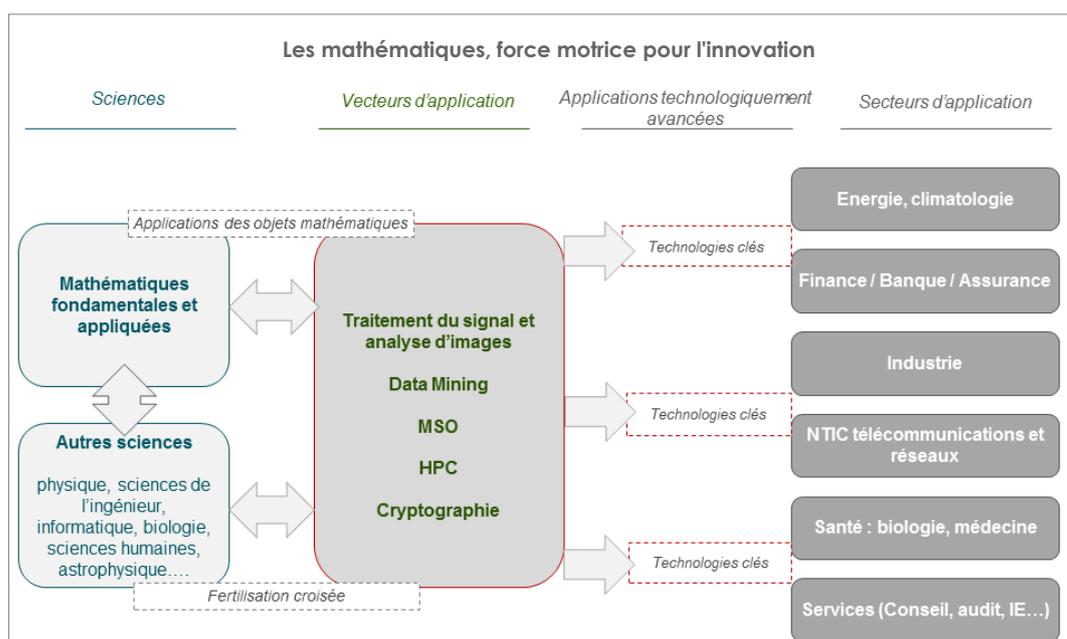
1. Les mathématiques avancées : moteur de l'innovation dans des champs d'application toujours plus nombreux

Les mathématiques sont un facteur essentiel dans la création de valeur et contribuent significativement au développement des technologies d'avenir

Les mathématiques avancées, mobilisées notamment au sein des secteurs cités dans la partie précédente, **fournissent des outils incomparables** basés sur le calcul, les statistiques et les probabilités. Elles offrent un cadre logique cohérent pour l'industrie et un langage universel pour l'analyse, la simulation, l'optimisation et le contrôle des procédés industriels.

Couplées à l'informatique, et en interaction avec la ou les sciences du secteur applicatif concerné, elles permettent de construire et de manipuler des modèles complexes et de proposer des simulations numériques **à la base de la création de valeur** dans l'industrie et les services.

Elles s'enrichissent des liens étroits tissés avec d'autres disciplines pour **résoudre de nouveaux problèmes**, contribuer au **développement des technologies clés** et permettre ainsi le **développement de nouvelles applications** dans de nombreux domaines.





Les mathématiques avancées sont primordiales pour le développement de 44% des technologies clés identifiées dans la quatrième édition de l'étude de prospective « Technologies clés 2015 » publiée par le Ministère de l'Industrie.

Autrement dit, sur les 85 technologies répertoriées, 37 voient leurs progrès conditionnés de façon significative par des progrès dans le domaine mathématique. L'implication des mathématiciens dans les travaux de recherche présente une très forte valeur ajoutée, et dans certains cas, est indispensable à la levée des verrous technologiques.

Simulation moléculaire

Énergie nucléaire

Réseaux électriques intelligents

Technologies d'exploration et de production

d'hydrocarbures

Calcul intensif

Ingénierie génomique

Technologies pour l'imagerie du vivant

Ingénierie de systèmes complexes et systèmes de systèmes

Progressive/Intelligent Manufacturing

Sécurité holistique

Communications et données

Ces technologies sont **reconnues comme étant des leviers stratégiques pour la compétitivité des entreprises, et par extension de l'économie française**. Diffusantes, elles sont susceptibles de générer des gains de productivité importants dans les secteurs d'activité considérés et ouvrent souvent la voie au développement de nouveaux marchés.

A titre d'illustration, l'usage des mathématiques avancées est essentiel pour le développement des trois technologies clés suivantes, amenées chacune à révolutionner leur secteur d'application :

- Dans le secteur de l'énergie, les **réseaux électriques intelligents** constituent une technologie clé dans la mesure où ils permettent d'intégrer l'électricité d'origine renouvelable, de maîtriser les consommations énergétiques et d'éviter les pannes. Le remplacement des compteurs électriques traditionnels par des compteurs intelligents ouvre le marché à de nouveaux acteurs. Les mathématiques jouent un rôle clé dans leur développement, tant au niveau de la modélisation de l'architecture des systèmes, qu'à celui de l'analyse et du traitement des données collectées par les capteurs pour prévoir la consommation énergétique et optimiser les réseaux de distribution.
- Dans le secteur de la santé, le développement des **objets communicants** offre un potentiel de création d'activité important et par ailleurs apporte une réponse à l'enjeu sociétal qu'est le vieillissement de la population. Véritables assistants médicaux, les objets connectés de santé, sont nécessaires pour satisfaire la demande croissante de soin. Les mathématiques sont ici au cœur de la mesure des données collectées, de leur analyse et prévision, servant à un meilleur suivi du patient et une meilleure prise en charge de sa pathologie.

Enfin, outre la création de valeur induite, elles **contribuent également à la résolution des défis sociétaux liés aux changements climatiques, à la santé ou à l'énergie**.



Un rôle essentiel des mathématiques dans le développement des entreprises, appelé à se renforcer via la maîtrise par les entreprises de tout ou partie de 5 champs de compétences stratégiques embarquant des mathématiques fondamentales et appliquées

La contribution, invisible, directe ou indirecte, mais primordiale des mathématiques dans le développement des technologies clés et/ou produits, procédés et services qui transforment le quotidien devrait jouer en faveur d'une reconnaissance large de leur intérêt stratégique à l'échelle européenne, au même titre, probablement que les six technologies clés génériques (nanotechnologies, microélectronique, biotechnologie, photonique, matériaux avancés, systèmes de production / fabrication avancés) fléchées dans le programme cadre Horizon 2020.

Et cela, au moment même où **leur rôle dans l'entreprise est amené à se renforcer**, en réponse aux besoins croissants de disposer d'outils efficaces pour maîtriser des systèmes de plus en plus complexes et de gérer des volumes toujours plus importants de données hétérogènes avec des contraintes économiques et réglementaires importantes.

Cette contribution passe notamment par la mobilisation, par de nombreux secteurs d'activité, de 5 grands champs de compétences stratégiques, fondés, intégralement ou partiellement³⁵, sur les mathématiques :

- **Traitement du signal et analyse d'images**
- **Data Mining** (statistiques, analyse de données et apprentissage)
- **MSO** (Modélisation - Simulation – Optimisation)
- **HPC** ("High Performance Computing" ou calcul haute performance)
- **Sécurité des systèmes d'informations et Cryptographie**

La maîtrise de ces champs de compétences par les entreprises est vue comme essentielle pour leur permettre de relever les défis industriels actuels et futurs, spécifiques ou non à leur secteur d'activité, et rester compétitives.

Le caractère prioritaire et stratégique de chacun de ces champs varie en fonction des défis technologiques et enjeux de compétitivités propres à chaque secteur étudié, à l'exception du *Data Mining* et de la MSO, largement reconnus comme des compétences transversales pour l'industrie et les services (et par ailleurs déjà fortement présentes au sein des entreprises), et dont le caractère critique pour la compétitivité future des entreprises devrait encore se renforcer dans les années à venir.

³⁵ Ces champs de compétences mobilisent également en particulier l'informatique et la physique et d'autres domaines scientifiques liés à leurs champs d'applications (biologie, chimie, etc.)



Energie

- **Chiffres clés du secteur (2013)**
 - 31,7 Mds€ de la valeur ajoutée
 - 144 000 salariés
- **Domaines traditionnellement consommateurs de mathématiques**
 - Production d'énergie (optimisation de la distribution d'électricité)
 - Prédiction d'incidents nucléaires (simulation du fonctionnement d'une centrale nucléaire)
 - Détection des défauts de circuits de refroidissement (traitement du signal et analyse d'images)
 - Segmentation de la clientèle (Data Mining)
- **De nouveaux enjeux de compétitivité mobilisant les mathématiques**
 - Fourniture d'une énergie durable (adaptation des systèmes électriques à l'intermittence des ENR)
 - Optimisation de l'extraction des combustibles fossiles

Applications

Dans le contexte de transition énergétique, les systèmes électriques doivent être adaptés pour gérer l'intermittence de la production des énergies renouvelables. La mobilisation des compétences MSO pour analyser les données collectées sur les parcs éoliens et solaires, et Data Mining pour optimiser leur fonctionnement permet de lever ce verrou.

Dans le secteur pétrolier, l'imagerie sismique permet de cartographier un sous-sol et d'estimer les paramètres physiques (perméabilité des roches, porosité etc.) du sous-sol afin de déterminer où il est le plus optimal de forer un nouveau puits, et ainsi se faire une idée de la rentabilité du projet.

35% des technologies clés à l'horizon 2015 dans le domaine de l'énergie sont impactées par les mathématiques et **18% très fortement**



Santé

- **Chiffres clés du secteur (2013)**
 - 65 Mds€ de valeur ajoutée
 - 211 000 salariés et 500 000 emplois associés
- **Domaines traditionnellement consommateurs de mathématiques**
 - Imagerie médicale (traitement du signal et analyse d'images)
- **De nouveaux enjeux de compétitivité mobilisant les mathématiques**
 - Numérisation des données clients (analyser la performance des procédures médicales pour éliminer les tâches inefficaces et identifier les opportunités d'amélioration)
 - Contrôle budgétaire (modélisation prédictive pour déterminer la meilleure allocation des ressources de R&D en tenant compte des chances de la recherche à aboutir)
 - Développement des objets de santé connectés (détection précoce, adaptation du traitement aux caractéristiques spécifiques du patient)

Applications

Dans le domaine de la santé, l'exploitation des données permet de supporter la médecine en matière prédictive (prévoir un risque de maladie chez certains patients à partir du génome), en la rendant plus pertinente (algorithmes décisionnels pour établir un diagnostic), en termes de personnalisation (toutes les données connues grâce à la génétique permettent d'adapter les traitements au patient, en fonction de son profil génétique) et de pharmacovigilance (déduire les effets secondaires des médicaments et mieux les prévenir).

Par ailleurs, la simulation numérique permet de tester virtuellement un grand nombre de configurations d'essais cliniques et de sélectionner les paramètres optimums pour leur réussite.

50% des technologies clés à l'horizon 2015 dans le domaine « santé, agriculture et agroalimentaire » sont impactées par les mathématiques **dont 20% très fortement**



Banque, finance et assurance

- **Chiffres clés du secteur (2013)**
 - 84 Mds€ de valeur ajoutée
 - 370 000 salariés
- **Domaines traditionnellement consommateurs de mathématiques**
 - Analyse du comportement client (traitement des données)
 - Gestion du risque par diversification de portefeuille (détermination d'un risque moyen par pondération de différentes catégories d'actifs)
- **De nouveaux enjeux de compétitivité mobilisant les mathématiques**
 - Automatisation du trading (exploiter les données de cotation en continu)
 - Evaluation du risque de contrepartie (développer de nouvelles méthodes numériques pour accélérer la vitesse de calcul)
 - Paiements en ligne (crypter les transactions pour les sécuriser)
 - Nouveaux produits dérivés (modélisation pour les caractériser et prévoir leur comportement sur le marché)

Applications

L'utilisation des techniques de traitement des données a récemment fait son apparition en banque d'investissement, en raison de la progressive automatisation du trading. Ces techniques facilitent le *market making* (proposer de façon régulière et continue des prix à l'achat et à la vente afin d'offrir une contrepartie à tout acheteur ou vendeur sur des titres souvent non liquides) dans la mesure où en exploitant en temps réel les informations de cotation, elles permettent d'optimiser le placement d'ordres et ainsi assurer la liquidité des titres, ce qui participe à l'efficacité des marchés.

Avec la crise financière et l'évolution de la réglementation, la mesure du risque de contrepartie des produits dérivés est devenue incontournable. Pour l'appréhender, les acteurs du marché ont recours principalement à deux méthodes d'évaluation (CVA, DVA) dont la vitesse de calcul est trop longue en comparaison avec le temps réel de la finance. Le HPC permet de réduire le temps de calcul.



Industrie

- **Chiffres clés du secteur (2013)**
 - 236,2 Mds€ de valeur ajoutée
 - 3 121 000 salariés
- **Domaines traditionnellement consommateurs de mathématiques**
 - Capteurs embarqués (collecte de données de production, d'utilisation etc.)
 - Conception des biens industriels (modélisation des pièces, simulation numérique de l'assemblage et optimisation du processus de production)
- **De nouveaux enjeux de compétitivité mobilisant les mathématiques**
 - Rendre intelligibles les données collectées (établir des corrélations par traitement statistique)
 - Contrôler la production à distance, vérifier le respect des normes du produit fini (analyse d'images)
 - Récupérer une information expérimentale toujours plus riche, multi échelle, pour valider les modèles de simulation et gérer l'incertitude (traitement du signal, MSO)

Applications (nanomatériaux)

Pour mesurer des objets à l'échelle nanométrique, il faut plusieurs microscopes, chacun étant un capteur spécifique. Pour avoir la mesure parfaite, il faut pouvoir prendre l'information recueillie par chaque capteur et les fusionner : utiliser la force de chaque capteur et ne fournir qu'une information à l'utilisateur avec une incertitude contrôlée. Cette fusion des données requiert la maîtrise des compétences mathématiques.

Dans l'idéal, les nanoparticules sont isolées, mais parfois elles s'agglomèrent, ce qui peut être dangereux pour l'humain et l'environnement, et n'est pas voulu par industriel. La MSO, couplée à la caractérisation, est cruciale pour comprendre les mécanismes d'agrégation.

46% des technologies clés à l'horizon 2015 dans les domaines chimie-matériaux-procédés et des transports sont impactées par les mathématiques **dont 8% très fortement**



NTIC, télécoms et réseaux

- **Chiffres clés du secteur (2012)**
 - 88,7 Mds€ de valeur ajoutée
 - 665 200 salariés
- **Domaines traditionnellement consommateurs de mathématiques**
 - Téléphonie mobile (allocation des fréquences, gestion des appels)
 - Internet (conception des protocoles de communication, prévision de l'évolution des réseaux)
 - Electronique grand public (codes correcteurs d'erreurs pour la lecture de CD, possibilité de 3G sur le téléphone)
- **De nouveaux enjeux de compétitivité mobilisant les mathématiques**
 - Connectivité des objets (collecte des données, analyse des usages)
 - Sécurisation du cloud (cryptographie)

Applications

Les réseaux sont la cible privilégiée des hackers dans la mesure où y transitent des données clients et données confidentielles (stratégies d'entreprises, secrets industriels), que les risques sont faibles (attaques repérées a posteriori, source difficilement traçable) et les gains potentiels importants. La multiplication exponentielle et l'hétérogénéité grandissante de ces données à crypter appellent des développements algorithmiques de plus en plus complexes.

Les mathématiques sont au cœur de l'adaptation des réseaux aux communications du futur, toujours plus complexes, tout en conservant un niveau supérieur de qualité de service. Par exemple, l'utilisation de la théorie des échantillonneurs de Gibbs dans le développement d'outils de modélisation et simulation permet de maximiser le rapport entre débit offert aux utilisateurs et énergie consommée pour les réseaux à petites cellules (3G/4G).

76% des technologies clés à l'horizon 2015 dans le domaine des TIC sont impactées par les mathématiques **dont 24% très fortement**



2. Les compétences mathématiques sont intégrées sur l'ensemble de la chaîne de valeur des entreprises

Plusieurs modalités d'intégration pour des compétences présentes sur l'ensemble de la chaîne de valeur des entreprises, dont la mobilisation devrait s'accroître dans les années à venir

Les modalités d'intégration des compétences mathématiques dans l'organisation des entreprises et notamment celles liées aux 5 champs ci-dessus varient principalement en fonction de leurs stratégies de R&D, de leurs priorités de développement. Deux approches complémentaires sont envisageables. Elles peuvent choisir d'internaliser les compétences mathématiques stratégiques pour leur compétitivité via le recrutement de « mathématiciens » ou l'investissement dans des outils à fort contenu mathématique pour des activités et projets stratégiques (et confidentiels). Elles peuvent également avoir recours à la recherche académique pour tester des hypothèses et étudier de nouveaux champs de développement sur des sujets plus prospectifs, potentiellement générateurs de revenus, mais à plus long terme ou encore faire appel à des start-ups spécialisées en algorithmique des logiciels, en modélisation et simulation numérique...

L'internalisation des compétences mathématiques au sein des entreprises peut se décliner de la façon suivante :

- le recrutement ciblé de **docteurs ou ingénieurs-docteurs en mathématiques**, experts pointus dans leur domaine ;
- le recrutement d'**ingénieurs dotés de compétences mathématiques avancées**, capables de comprendre les modèles développés par les experts et de les utiliser de manière pertinente ;
- l'**utilisation d'outils embarquant des mathématiques avancées**.

Ces compétences sont disséminées dans plusieurs directions, départements, équipes métiers **ou centralisées** au sein de l'organisation.

4 schémas types ont été identifiés, étant entendu qu'ils ne sont pas exclusifs les uns des autres et peuvent coexister au sein d'une même entreprise.

- **Schéma 1 : Pôle de compétences rattaché à la Direction de la stratégie**

Les entreprises considérant les mathématiques comme un outil au service de la stratégie du groupe disposent **d'un centre d'expertise rattaché à la Direction de la stratégie**. Il peut s'agir d'équipes pluridisciplinaires associant mathématiciens, économistes et informaticiens.

C'est le cas par exemple du Département Optimisation, Simulation, Risques et Statistiques pour les marchés de l'énergie (OSIRIS) chez EDF dont 8 directions internes et 11 filiales d'EDF sont clientes. Le Département développe des logiciels d'aide à la décision pour prévoir les besoins énergétiques et optimiser la production électrique du Groupe EDF, contribue à anticiper les ruptures du monde de l'énergie et met à disposition du Groupe son expertise reconnue en mathématiques appliquées. C'est aussi le cas chez GDF-Suez avec son Centre d'Expertise en Etudes et Modélisation Economique (CEEME), rattaché à la direction de la stratégie du groupe.



- **Schéma 2 : Pôle de compétences centralisé au sein de la R&D**

Un club restreint de grands groupes industriels ont fait le choix de disposer d'une **équipe de Recherche et Développement en mathématiques dédiée**, considérant ces compétences comme stratégiques pour innover et se différencier. Ces entreprises à fort contenu technologique développent ainsi leurs propres modèles et codes de calcul, outils et leviers stratégiques pour leur compétitivité.

C'est le cas par exemple dans le groupe Safran, qui structure un Département de R&D spécialisé en Data Analytics, de Limagrain/Vilmorin qui structure également une équipe spécialisée. Au sein des Bell Labs (Alcatel-Lucent) une équipe d'environ 20 Mathématiciens est en place depuis environ 2 ans et elle pourrait s'étoffer dans les années qui viennent. L'entreprise Michelin a, quant à elle, mis en place depuis plusieurs années des équipes spécialisées au sein de la R&D : Conception et mise en œuvre d'outils de simulation ; Statistiques, Traitement d'Images et de données.

- **Schéma 3 : Compétences disséminées au sein de la R&D**

Le plus souvent, les mathématiciens sont **répartis dans les différents départements ou laboratoires de la R&D** selon les problématiques des différents sites de recherche organisés par métier (exemple en énergie : calculs de neutronique pour le nucléaire, mécanique des fluides, économie etc.). Plus rarement, ces compétences peuvent être **disséminées dans les équipes métiers** au gré de recrutements ad hoc sur des sujets spécifiques. C'est notamment le cas, lorsque la R&D n'est pas centralisée mais est intimement liée à l'activité opérationnelle.

C'est le cas chez TOTAL, GDF-Suez, ou encore chez Alstom ou AREVA où la R&D est portée par des Ingénieurs intervenant également au sein des Business Units opérationnelles.

- **Schéma 4 : Compétences diffuses dans l'ensemble de l'organisation, y compris en amont et en aval de la chaîne de valeur**

Enfin, s'ils demeurent difficilement identifiables, on estime qu'un nombre important de « mathématiciens » entendus ici au sens de **personnels s'appuyant sur un bagage mathématique important**, est disséminé dans les fonctions de production, de gestion des opérations industrielles ou de manière transverse dans les entreprises notamment en contrôle financier, *supply chain*, marketing, etc.

Les compétences mathématiques sont ainsi mobilisées sur l'ensemble de la chaîne de valeur – de la R&D à la commercialisation en passant par la production – du niveau le plus basique (proportionnalité, pourcentages, utilisation de tableurs etc.) à un niveau plus avancé selon la spécialité (statistiques pour les calculs de fiabilité, simulation-prévision en procédés industriels etc.).

Qu'elles soient clairement identifiées ou non au sein de l'entreprise, elles sont considérées comme stratégiques pour la gestion des « opérations courantes » ou la conduite de projets et activités à fort potentiel. Cette tendance pourrait s'accroître dans les années à venir.

Les entreprises qui mobilisent d'importantes compétences en ingénierie mobilisent, de fait, des compétences mathématiques en masse. Chez EDF par exemple, au sein de la R&D, on peut estimer que 90% des personnels ont un bagage significatif en mathématiques.



Dans « *Un nouvel âge d'or pour les Mathématiques en entreprise ?* », Jean-Pierre Bourguignon fait référence par exemple à Veolia qui prévoit d'augmenter le poids des « mathématiciens » dans ses effectifs ingénieurs de 8% à 20% sur une période de dix ans.

On observe par ailleurs un accroissement de recrutements ciblés, en particulier sur le **data analytics** (cf. zoom infra). D'où l'émergence de campagnes de recrutement de profils mathématiques, notamment pour les nouveaux métiers de « *data scientists* » ou le montage de nouvelles équipes en statistiques et modélisation, en bio-statistiques, ...

Des enjeux spécifiques de compétitivité dans de nombreux secteurs industriels sont associés à la mobilisation accrue de ces compétences, bien au-delà des perspectives de développement de nouveaux services aux consommateurs auxquels il est traditionnellement fait référence quand on parle du « Big Data » :

- L'analyse des données d'utilisation de réseaux de communication de plus en plus inter-opérables pour développer le *Network Forecast*,
- Le développement de la *maintenance prédictive* au sein des industries du transport notamment, en s'appuyant sur l'utilisation de capteurs multiples et la collecte et l'analyse de données massives ou l'identification de corrélations dans des paquets de données,
- Le développement du *market making* dans le domaine de la banque visant la cotation en continu et le trading automatisé,
- Le développement des Smart Grids pour la gestion, la prévision et l'optimisation des consommations énergétiques,
- ...

Mais la traduction de ce besoin, tant par les entreprises, en termes de compétences attendues, que par la communauté académique, en termes de formations, n'est pas encore totalement opérée.



Du Data Mining au Big Data

Le **Data Mining** regroupe des méthodes d'intelligence artificielle, d'apprentissage automatique et de statistiques permettant d'extraire des informations compréhensibles d'un ensemble de données.

Avec l'apparition du **Big Data** en tant que grand volume de données hétérogènes et instantanées, les techniques et outils du Data Mining doivent se réinventer.

Le Big Data est un **champ de création de valeur considérable** tant ses applications sont nombreuses et transverses aux secteurs tels que la santé, la banque et la finance, les TIC ou encore aux métiers liés à la gestion de l'environnement.

Elles constituent un **facteur de renforcement de la capacité d'innovation des organisations** dans la mesure où elles induisent de **nouveaux défis** consistant à :

- Considérer les données dans leur variété, même si leur utilité n'est pas démontrée et leurs paramètres pas encore maîtrisés.
- Repenser les modes de stockage et de sécurisation des données actuels.
- Donner du sens à ces données.
- Valoriser commercialement les informations tirées de ces données.

Pour les relever, **la maîtrise de compétences en interaction avec les mathématiques** est nécessaire :

- Analyse statistique
- Algorithmique
- Visualisation
- Intelligence artificielle
- Apprentissage automatique
- Modélisation de problèmes business
- Optimisation
- Programmation informatique
- Architecture de bases de données



Chiffres-clés

Un **marché mondial estimé à 24 Mds\$** en 2016

Taux de croissance annuel : **31,7%**

10% des entreprises françaises déclarent avoir mis en place des projets Big Data

CA France 2014 : **2,8 Mds€**

Création de **137 000 emplois** d'ici à 2020

Sources : Observatoire de l'Innovation de l'Institut de l'entreprise, APIEC, AFDE, MS GEM



Une diversité de profils mathématiques recherchés mais un idéal type : l'ingénieur-docteur, en particulier au sein des grands groupes dont la R&D est très fortement liée aux opérations industrielles. La tendance est différente dans les PME

Dans les centres de R&D où les mathématiciens travaillent à plein temps sur des sujets de recherche amont, il semble que le profil privilégié soit celui de l'**ingénieur-docteur**. Ce qui prévaut est la combinaison d'un **savoir-faire très pointu dans une spécialité** et la capacité **d'investigation aux interfaces**. La distinction ne se fait pas au niveau des formations, même si l'école d'ingénieurs d'une part, grâce à son approche plus généraliste, garantit la maîtrise du langage de l'ingénierie, et la thèse d'autre part, est gage de l'excellence nécessaire pour être crédible face aux meilleurs laboratoires de recherche. Elle se fait au niveau des qualités développées telles que l'autonomie, la compétence en gestion de projet ...

C'est en particulier le cas pour les grands groupes. Ce trait est renforcé dans les entreprises où R&D et Opérations industrielles (conception, fabrication) sont fortement liées.

Ce constat a d'ores et déjà été souligné dans le Livre Blanc sur la valorisation dans l'industrie du diplôme de docteur en mathématiques appliquées coordonné par la SMAI en 2011.

Un frein au recrutement universitaire réside dans la multiplication des formations, qui nuit à leur lisibilité. Faute d'une vision claire de leur qualité, les formations prestigieuses de type grande école et bien souvent franciliennes, sont privilégiées à titre de valeur refuge. Les entreprises recrutent dans les viviers qu'elles connaissent, dans lesquels elles ont confiance, à savoir les formations dont les personnels en place sont issus, ou dont ils ont entendu parler via leur réseau.

De manière plus générale, l'entreprise attend du mathématicien qu'il soit en mesure de répondre à ses problématiques industrielles. Pour cela, **des compétences mathématiques avancées sont demandées en lien avec le secteur et ses défis**, ce qui en termes de recrutement correspond souvent au **ciblage de formations repérées**. Ainsi en finance, les connaissances en modélisation mathématique, probabilités, EDP, contrôle stochastique, calcul numérique et programmation informatique étant nécessaires en gestion des risques, les embauchés dans leur majorité sont titulaires d'un mastère spécialisé en mathématiques financières.

Paradoxalement, alors qu'elles sont plus éloignées des laboratoires académiques que les grands groupes, les PME font plus facilement que les grandes entreprises appel à des profils universitaires, intégrés dans l'entreprise (post-doc notamment) ou dans le cadre d'un contrat CIFRE sur des projets spécifiques. Ceci peut notamment s'expliquer, dans le cas des contrats CIFRE en particulier, par des capacités propres de R&D moindres que dans les grands groupes.



3. La mobilisation des compétences mathématiques fait l'objet d'une attention croissante mais est encore peu suivie

Une contribution et un potentiel de mieux en mieux identifiés qui engendrent des stratégies d'intégration plus offensives et structurées

Si le recrutement ciblé de personnels pour leur « expertise » en mathématiques (« expert senior en mathématiques », « expert en algorithmique », « expert en simulation numérique »), constitue aujourd'hui encore plus l'exception que la règle, les perspectives d'intégration de compétences pointues en *data analytics* et l'adaptation au tournant digital, au sein de nombreux secteurs, pourraient faire évoluer cet état de fait.

Couplée aux enjeux de simulation et d'optimisation de plus en plus complexes dans les domaines de l'Energie (traitement multi-échelles et multi-temps), de la Communication (gestion des réactions en chaînes sur les réseaux), de la Santé (simulation du système de fonctionnement des organes et du cerveau), de l'Industrie en conception, production, maintenance (gestion de la production par lots), Services (pilotage des réseaux logistiques multi-échelles)... l'intégration de ces compétences représente un potentiel certain et les entreprises sont en passe de développer des stratégies d'intégration plus offensives et structurées, visant le recrutement des meilleurs profils d'où qu'ils viennent, en France ou à l'étranger, d'Ecoles d'Ingénieurs ou de l'Université, en particulier pour renforcer leurs équipes et les départements de R&D.

On peut ainsi considérer qu'il faut nuancer le constat souligné au sein du rapport de la *European Science Foundation, Forward Look « Mathematics and Industry »* en 2011 selon lequel les mathématiques sont caractérisées par « une contribution invisible pour des succès visibles ». La contribution actuelle ou potentielle des Mathématiques est de plus en plus objectivée au sein des entreprises qui mesurent précisément des gains de productivité liés à l'intégration, assez massive désormais, de compétences en MSO et évaluent le potentiel d'intégration de nouvelles compétences.

Le témoignage du groupe Safran va dans ce sens : « L'expérience de la mise en œuvre d'un système PHM (Pronostic & Health Monitoring) sur les moteurs ayant été un succès, conscients des opportunités qu'offrent les analyses de données, nous avons décidé de traiter aussi d'autres sources, en plus des données opérationnelles enregistrées sur les vols, comme celles provenant de la production et des tests de moteurs. De nouveaux '*datalabs*' pourraient être envisagés au sein du Groupe Safran pour participer aux efforts souhaités avec l'introduction de l'entité Safran-Analytics. » (Safran)

Cela suppose, tant de la part des entreprises que de la part de la communauté académique, de déployer des démarches de valorisation et de suivi des compétences. Or, peu d'entreprises pilotent formellement les recrutements et le suivi des personnels formés en ou par les mathématiques.

Le suivi de la carrière des mathématiciens semble d'autant plus critique qu'une majorité d'entre eux, au fil des années, s'orientent vers des postes de management et perdent, d'une certaine manière, leur rôle d'expert.

Dans le reste des cas, et souvent pour les entreprises à plus fort contenu technologique, on observe une hiérarchie d'expertise en parallèle de celle du management. En fonction de leurs souhaits d'évolution, les mathématiciens peuvent soit conserver un rôle d'expert et continuer



d'approfondir leurs compétences mathématiques, soit s'orienter vers le management, ce qui ne les appelle plus à développer des modèles mathématiques mais, pour autant, requiert d'eux qu'ils restent aptes à les comprendre.

A l'exception de quelques grands groupes qui disposent d'une filière de carrière d'expertise (parallèle à celle du management) et qui, à ce titre, « étiquettent » les compétences mathématiques (algorithmique, statistiques, automatique), rares sont les personnels recrutés sur des compétences mathématiques qui peuvent être identifiés (répertoriés, comptabilisés, suivis) comme spécialistes du champ mathématique.

C'est également vrai dans les services R&D, une grande partie des chercheurs étant **identifiés dans l'entreprise comme « ingénieurs en R&D »**. Par ailleurs, lors du recrutement du personnel de recherche et développement, rares sont les entreprises qui recherchent explicitement un poste de « mathématicien », considérant la maîtrise des outils et concepts mathématiques comme un prérequis.

La grande majorité des entreprises ne dispose **pas de processus institutionnalisé** pour recourir aux compétences et outils mathématiques.

A noter néanmoins, le cas singulier d'une entreprise à fort contenu technologique dans le secteur de l'énergie dont la division R&D dispose de son propre outil de gestion prévisionnelle des emplois et des compétences (GPEC) intégrant comme compétences les mathématiques appliquées et ses différentes branches : calcul scientifique, statistiques, mathématiques financières, probabilités, mécanique des fluides. Les entités opérationnelles s'en servent pour faire remonter au management leurs besoins en compétences. L'outil permet également d'assurer le suivi (décompte) du nombre de compétences pour chaque branche.

Ce constat interroge sur la capacité des entreprises et de leurs personnels à conserver un niveau d'expertise suffisant en mathématiques, à mettre à jour leurs compétences, à identifier au sein de l'entreprise ou à l'extérieur les ressources pertinentes pour intervenir sur de nouveaux programmes ou de nouveaux projets.

Avec l'expression de besoins spécifiques croissants (*data analytics*, HPC, etc.), la question de la capacité d'identification rapide de compétences pointues, hybrides, ou transverses et non spécifiquement liées à l'objet des études menées par les jeunes diplômés (par exemple, des compétences en MSO sont susceptibles d'être acquises dans le cadre d'une formation en mathématiques, comme d'une formation en physique mobilisant le calcul, la simulation...) va se poser ou se pose déjà.

La communauté académique a initié, dans cette perspective, la mise en place du Label C3I pour attester de la compétence en HPC de docteurs. Une centaine de docteurs a aujourd'hui obtenu ce label. Le principe pourrait être étendu aux champs de la MSO ou encore du *data analytics* ou « big data » dans le futur.



4. L'appel à la recherche publique : une autre voie privilégiée pour la mobilisation de compétences mathématiques avancées

Recrutement et appel à la recherche ne sont pas exclusifs, mais le choix entre les deux est fondé sur des besoins différents. Le choix des partenaires académiques repose le plus souvent sur des relations inter-personnelles de long terme.

Les entreprises collaborent avec la recherche académique sur des sujets plus en amont, à un **niveau plus fondamental**. Il s'agit de tester l'intérêt d'une hypothèse, sa viabilité économique, avant d'investir davantage et d'éventuellement d'internaliser les compétences.

En outre, toutes les entreprises reconnaissent le caractère indispensable de la collaboration avec la recherche académique pour **se tenir au fait des dernières avancées scientifiques et technologiques**. Pour rester compétitives, elles se doivent d'aller au-delà de la veille technologique et intégrer des connaissances issues de la recherche.

Les entreprises collaborent avec la recherche académique, mais cela représente une part assez faible des volumes financés alloués dans la mesure où, comme expliqué précédemment, la relation recherche-entreprise manque encore de structuration.

Les **critères de choix** semblent principalement reposer sur les éléments suivants :

- **Des relations de confiance installées sur la longue durée entre une personne de l'entreprise et un chercheur** (connaissances inter-personnelles) et ce, quelle que soit la taille de l'entreprise. Le chercheur en R&D a pris des contacts tout au long de sa formation en université ou en grande école.
- **Au gré des séminaires abordant des thématiques de recherche de pointe**, par lesquelles académiques et industriels sont également intéressés.
- **La proximité géographique** des laboratoires avec un centre de recherche de l'entreprise.
- **La reconnaissance de l'excellence de la recherche française** : ce dernier critère est discriminant. La qualité du « vivier » français au sein des laboratoires du CNRS, d'Inria... est incontestable pour les Grands Groupes et comme pour les PME.

Par ailleurs, la partie purement algorithmique, notamment en modélisation et simulation numérique, est souvent sous-traitée à des start-ups fondées par des mathématiciens. Leur implémentation est ensuite assurée par l'industriel en collaboration avec le chercheur afin de l'adapter aux spécificités de son besoin.



PARTIE 4 – CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES POUR RELEVER LES DEFIS DE DEMAIN EN S'APPUYANT SUR LES MATHEMATIQUES

Malgré un effectif relativement modeste (4000 chercheurs et enseignants-chercheurs), **la recherche française en Mathématiques reste aujourd'hui l'une des meilleures au Monde**. L'appareil scientifique français en mathématiques est par ailleurs particulièrement bien connecté sur le plan international (près de la moitié des publications sont écrites dans le cadre d'une collaboration internationale, loin devant les Etats-Unis ou la Chine).

Cette situation constitue potentiellement un avantage concurrentiel important pour l'économie française, du fait de la grande transversalité de cette discipline et des enjeux cruciaux qu'elle adresse à travers sa forte contribution dans 5 domaines clés : le traitement du signal et l'analyse d'images, le *data mining*, la MSO, le HPC, et les problématiques de sécurité des systèmes d'information ; les progrès dans ces domaines conditionneront notre compétitivité dans des secteurs aussi stratégiques que l'Energie, la Santé, la Banque et l'Assurance ou encore les Télécommunications.

Nos travaux démontrent l'impact socio-économique fort des mathématiques en France, comparable aux pays voisins : 9 % des emplois impactés (versus 10% pour le Royaume Uni, 11% pour les Pays-Bas), emplois à forte valeur ajoutée (15% du PIB français versus 16% pour le Royaume Uni), emplois davantage porteurs de croissance (+0,9 % pour les emplois fortement impactés par les mathématiques vs 0,5% pour la moyenne française).

Les entretiens que nous avons menés auprès des entreprises font état à la fois d'**un besoin croissant de mathématiciens** et d'une prise de conscience progressive de l'enjeu de la bonne intégration des mathématiciens.

Ce diagnostic d'ensemble est très favorable aux mathématiques. Il se heurte néanmoins à plusieurs faiblesses :

- *La structuration dans la relation Recherche-Industrie ;*
- *La lisibilité du dispositif d'enseignement supérieur et de recherche ;*
- *L'attractivité des filières d'enseignements en mathématiques (stabilité des effectifs) et des parcours en entreprise pour les docteurs alors même que les débouchés professionnels sont excellents à l'issue de ces formations ;*
- *Le suivi des carrières mathématiques en entreprises.*

Dans ce contexte, il nous semble que quatre grandes dimensions doivent être prises en compte pour relever les défis de demain dans les champs de la connaissance, de l'innovation et de la compétitivité en s'appuyant sur les mathématiques.



La qualité des liens recherche-industrie, par le renforcement des capacités et leviers pour la recherche contractuelle, la recherche partenariale et le transfert

La relation recherche-industrie, à la fois avec les PME et les Grand Groupes, mériterait d'être accompagnée. Plusieurs orientations peuvent être considérées.

- L'extension d'**initiatives comme l'hôtel à projets Maimosine, HPC-PME ou CEMOSIS** qui semblent avoir fait la preuve de leur valeur ajoutée dans la relation avec les PME. Ce type d'initiative pourrait être déployé, dans l'optique de valoriser de manière plus structurée les offres de compétences et favoriser la recherche contractuelle ;
- L'accentuation de la participation des laboratoires de mathématiques aux **Instituts Carnot**, pour accélérer le développement de la recherche contractuelle et partenariale, avec les PME et les Grands Groupes. Cette participation repose très fortement de la pérennisation des dispositifs existants, en particulier pour les PME (conditions d'accès aux dispositifs, niveau de co-financement des projets collaboratifs, mobilisation du Crédit Impôt-Recherche (CIR)...)
- La poursuite des **rencontres recherche-industrie, journées ou séminaires thématiques**, etc. organisés par notamment par AMIES, les Laboratoires et Laboratoires d'excellence en Mathématiques, les sociétés savantes, ou encore la FSMP, couplée au renforcement du réseau national des correspondants industrie au sein des laboratoires de mathématiques par des ressources humaines accrues, mutualisées ou non ;
- L'implication accrue des communautés mathématiques dans leurs **écosystèmes régionaux d'innovation** (Pôles de compétitivité, SATT) pour favoriser ce dialogue et l'ouverture de la communauté mathématique vers des domaines d'application plus larges ;
- L'adaptation des **critères d'évaluation de la carrière des chercheurs** (comités CNU 25 et 26), en intégrant des critères liés à la valorisation des activités de recherche appliquée et de transfert.

La capacité d'adaptation des parcours de formations et de valorisation des compétences acquises

Cette dimension semble particulièrement stratégique pour répondre aux besoins d'intégration dans les entreprises de compétences spécifiques et faciliter la valorisation de compétences acquises par les jeunes diplômés (Master, Ingénieurs, Docteurs en particulier) et leur insertion professionnelle. Plusieurs leviers semblent pouvoir être mobilisés.

- **La conduite d'une réflexion organisée en collaboration avec les industriels sur l'évolution des compétences académiques et professionnelles attendues en particulier dans le domaine du data analytics et du HPC ;**
- **L'extension des démarches de labélisation des compétences acquises pour les Docteurs** dans ces mêmes domaines et dans celui de la MSO en s'assurant d'une reconnaissance concrète, par les entreprises, des labels concernés ;
- **L'ouverture accrue des formations en mathématiques vers l'industrie et d'autres disciplines** : ouverture des formations en mathématiques vers des thématiques relevant des domaines d'application, accroissement des rencontres industrielles dans le cadre des formations doctorales, développement de dispositifs ciblés pour un passage des



doctorants en entreprises au cours de leur formation afin de promouvoir la mobilité public-privé (les thèses CIFRE de mathématiciens sont rares, et le doctorat-conseil est presque ignoré, alors que ce mécanisme existe depuis 2009.)

La poursuite de la mobilisation des compétences mathématiques par l'industrie, leur suivi et la valorisation des carrières mathématiques dans le secteur privé

La valeur ajoutée de la mobilisation des compétences et des outils mathématiques, qu'ils soient avancés ou non, semble désormais établie pour un nombre important de secteurs et a vocation à se renforcer dans les années à venir. C'est certainement au sein des **PME les moins actives en R&D** que cette intégration est la moins importante. Une majorité des leviers mentionnés ci-dessus pourrait faciliter une **diffusion plus large des compétences et outils mathématiques dans ces entreprises**.

Au-delà, il nous semble qu'un effort reste à mener en entreprise pour **assurer le suivi des personnels jugés stratégiques pour leur compétence mathématiques**, mettre à jour les compétences de leurs mathématiciens..., et leur permettre de conserver une expertise suffisante.

Enfin, l'attractivité des carrières scientifiques restant un problème national - le domaine des mathématiques est également impacté -, il semble critique de **renforcer la valorisation des débouchés professionnels associés aux parcours de formation en mathématiques**.

La poursuite du soutien à la recherche et à la formation en mathématique

Le maintien, voire l'accroissement de l'impact socio-économique des mathématiques devra passer par une **exposition plus forte de la communauté mathématique** et le **renforcement de la lisibilité des compétences françaises** aussi bien en recherche qu'en formation. Le renforcement et la structuration d'une communication à l'échelle nationale sur les compétences mathématiques françaises (recherche et formation) et leurs applications, en étendant les contenus communiqués par l'INSMI, AMIES, les sociétés savantes, la FSMP, l'IHP aux offres de compétences, aux grands domaines de compétences en formation, etc. pourraient être envisagés. Cette communication devrait s'inscrire dans une démarche globale, incluant aussi l'enseignement secondaire.

L'accessibilité à des **points de contacts par laboratoire** (avec des interlocuteurs clairement identifiés) pour le lien recherche-industrie pourrait par ailleurs être renforcée.

Au-delà, la **participation à un lobbying national et européen pour promouvoir les mathématiques** en tant que technologie clé et assurer une **représentation plus directe au sein des grands programmes nationaux et internationaux** (par l'intermédiaire du MESR, d'AMIES, de l'INSMI, des Sociétés savantes, d'EU-MATHS-IN, de l'ECMI, de l'EMS, ...) est un levier important pour la valorisation des compétences françaises en mathématiques et de leur contribution au développement économique et à l'innovation.

Enfin, la **poursuite du soutien direct à la recherche française** semble aujourd'hui stratégique pour permettre à la France de conserver sa place dans le panorama international, en particulier pour les champs de recherche qui contribuent aux 5 grands domaines de compétences évoqués en page 27.





ANNEXES

- A. Concepts et éléments de chiffrage quantitatifs pour l'étude**
- B. Matrice des professions et catégories socio-professionnelles « mathématiques » selon le poids des mathématiques dans l'occupation et le type de mathématiques mobilisées**
- C. Entretiens**
- D. Bibliographie**
- E. Glossaire**



A. Concepts et éléments de chiffrage quantitatifs pour l'étude

Délimitation du périmètre de la recherche mathématique

Nous avons retenu comme définition de la recherche en mathématiques l'ensemble des domaines listés par l'INSMI dans le rapport de prospective publié par son conseil scientifique en 2014.

- **Logique et fondations**
 - Théorie des modèles
 - Théorie descriptive des ensembles
- **Théorie des nombres et géométrie arithmétique**
- **Géométrie algébrique**
 - Géométrie algébrique complexe
 - Géométrie algébrique réelle
- **Algèbre**
 - Théorie des représentations
 - Algèbres d'opérateurs et géométrie non commutative
- **Topologie algébrique et géométrie**
 - Topologie algébrique
 - Topologie de basse dimension
- **Géométrie**
 - Analyse sur les variétés
 - Théorie géométrique des groupes
 - Singularités
- **Analyse et systèmes dynamiques**
 - Analyse complexe et géométrie analytique
 - Analyse harmonique
 - Systèmes dynamiques
- **Équations aux dérivées partielles**
- **Probabilités et statistique**
 - Théorie des jeux
- **Histoire des mathématiques**
- **Modélisation et calcul**
 -



Recensement et calcul des effectifs des formations en mathématiques et par les mathématiques

Nous avons retenu les formations obtenues avec le mot-clé « mathématiques » dans la base ONISEP.

Au niveau Master, on obtient 308 intitulés – hors écoles d'ingénieurs (traitées au niveau agrégé) – répartis comme suit :

- 163 Masters universitaires en mathématiques (mathématiques comme discipline de spécialité)
- 145 Masters universitaires par les mathématiques (autre discipline de spécialité)

On obtient également 27 intitulés de licences professionnelles.

Nous avons considéré que le poids des mathématiques était significatif quand son volume horaire était strictement supérieur à 4h par semaine en moyenne sur toute la durée de la formation post-bac.

Au niveau DUT, on obtient 19 formations dont :

- Les 17 DUT spécialités secondaires (disciplines scientifiques et techniques)
- 2 DUT spécialités tertiaires (GLT, STID)

On obtient également 3 intitulés de BTS.

La liste des écoles doctorales est fournie par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR) : 43 écoles doctorales habilitées à délivrer un doctorat en Mathématiques.

Le nombre d'étudiants inscrits dans les établissements publics sous tutelle du MESR en Masters et Doctorats de mathématiques, ainsi qu'en DUT par spécialité est disponible sur le site du ministère. Les effectifs inscrits dans les écoles d'ingénieurs sont publiés tous les ans par la Conférence des Directeurs des Ecoles Françaises d'Ingénieurs (CDEFI).

Pour les autres formations dont l'effectif n'est pas disponible au niveau de détail voulu, nous avons fait des extrapolations en multipliant le nombre de formations par le nombre d'établissements les dispensant (donnée ONISEP) et par l'effectif moyen d'une classe évalué comme suit :

- BTS : 30 étudiants par classe sur 2 ans
- Licences professionnelles : 20 étudiants par classe
- Masters universitaires : 9 étudiants par classe sur 2 ans



Extrapolation du nombre de formés en et par les mathématiques à leur poids dans l'emploi

Grâce aux données du MESR pour les formations universitaires, de la CDEFI pour les écoles d'ingénieurs et des calculs précédents, on connaît le nombre de diplômés en 2013 par niveau de formation :

- Master en mathématiques : 3 300
- Master par les mathématiques : 3 890
- Doctorat en mathématiques : 500
- DUT par les mathématiques : 32 016
- BTS par les mathématiques : 13 290
- Ecoles d'ingénieurs : 31 552

Cet effectif doit être multiplié par le taux d'insertion professionnelle de la population considérée, qui comme expliqué ci-dessous est proche de 100%.

En considérant que la vie professionnelle dure 35 ans en moyenne, nous avons reconstitué les effectifs diplômés depuis 1979 en appliquant un trend d'évolution par formation sur la période :

- Master : +1,8% en moyenne par an
- Doctorat : +1,1% en moyenne par an
- DUT : +2,3% en moyenne par an
- BTS : +4,2% en moyenne par an
- Ecoles d'ingénieurs : +3,6% en moyenne par an





Technologies clés

(cf page suivante)

Secteur	Technologies clés notées 3 ou 4 par plus de 50% des répondants	Technologies clés notées 3 ou 4 par plus de 75% des répondants
Chimie – Matériaux – Procédés	<ul style="list-style-type: none"> Capteurs Elaboration de composites – assemblage multimatériaux Matériaux fonctionnels, intelligents et de performance Nanomatériaux Contrôle non destructif 	<ul style="list-style-type: none"> Simulation moléculaire
Energie	<ul style="list-style-type: none"> Énergies marines Piles à combustible Technologies de l'hydrogène 	<ul style="list-style-type: none"> Énergie nucléaire Réseaux électriques intelligents Technologies d'exploration et de production d'hydrocarbures
Environnement	<ul style="list-style-type: none"> Capteurs pour l'acquisition de données Technologies pour la captation maîtrisée et le traitement des sédiments pollués 	
Santé, agriculture et agroalimentaire	<ul style="list-style-type: none"> Ingénierie du système immunitaire Capteurs pour le suivi en temps réel Technologies de diagnostic rapide 	<ul style="list-style-type: none"> Ingénierie génomique Technologies pour l'imagerie du vivant
TIC	<ul style="list-style-type: none"> Logiciel embarqué et processeurs associés Nanoélectronique Objets communicants Optoélectronique Robotique Technologies 3D Technologies de numérisation de contenus Valorisation et intelligence des données Virtualisation et informatique en nuages 	<ul style="list-style-type: none"> Calcul intensif Ingénierie de systèmes complexes et systèmes de systèmes Progressive/Intelligent Manufacturing Sécurité holistique
Transports	<ul style="list-style-type: none"> Mécatronique Moteurs à combustion interne Nouvelles technologies de turbomachine Outils et méthode de conception et de validation 	<ul style="list-style-type: none"> Communications et données



Contribution des mathématiques au développement des technologies clés

L'étude prospective « Technologies clés » publiée par le Ministère de l'Industrie tous les cinq ans liste les technologies reconnues comme étant des leviers stratégiques pour la compétitivité de l'économie française.

Nous avons donc transmis la liste des 85 technologies de l'édition 2010 « Technologies clés à l'horizon 2015 » à une quinzaine d'experts mathématiques, académiques et industriels.

Ils ont été invités à les noter de 1 à 4 selon la grille suivante :

Note	Signification
1	Très faible mobilisation des mathématiques ou utilisation de mathématiques « de base »
2	Mobilisation de mathématiques « avancées »
3	Certains progrès de la technologie clé considérée sont conditionnés par des progrès dans le domaine mathématique ; impliquer des chercheurs en mathématiques dans les travaux de recherche présente une valeur ajoutée
4	Les progrès de la technologie clé considérée sont principalement conditionnés par des progrès dans le domaine mathématique ; il est indispensable d'impliquer des chercheurs en mathématiques dans les travaux de recherche

Les technologies notées 3 ou 4 par plus de 50% des répondants sont considérées comme des sujets mobilisant les mathématiques.

Les technologies notées 3 ou 4 par plus de 75% des répondants sont considérées comme des sujets mobilisant fortement les mathématiques.



Quantification de l'impact direct des mathématiques sur l'économie en nombre d'emplois et en valeur ajoutée

Une référence difficilement contournable

L'étude réalisée par Deloitte sur l'impact économique des mathématiques au Royaume-Uni apporte des éléments quantitatifs (10% de l'emploi impacté, 16% de la valeur ajoutée). Inévitablement, ces éléments constituent une référence à laquelle les résultats de la France seront comparés. Pour des questions d'homogénéité et de comparabilité des études, nous suivons une démarche similaire.

En particulier, le corpus d'hypothèses sur l'impact des mathématiques par profession (en proportion d'une profession impactée) déterminé par Deloitte et validé par des groupes d'experts est réutilisé dans un premier temps.

Un ensemble d'inputs quantitatifs issus de l'INSEE

Nous avons utilisé les bases de données fournies par l'INSEE :

- Pour les emplois : sources DADS (Déclaration annuelle de données sociales), nombre d'emplois par PCS (Professions et Catégories Socioprofessionnelles : 415 postes/professions) et par NAF (Nomenclature d'activités française : 615 secteurs d'activités).
 - Sur le périmètre France entière, secteurs privé et public
 - En nombre de postes, postes annexes inclus (vs. Deloitte en nombre de salariés) : un poste correspond à un salarié dans un établissement, que ses périodes d'emploi soient distinctes ou identiques
 - Sur l'ensemble des types d'emploi (dont apprentissage, emploi aidé, stagiaire, CDI, CDD),
 - En flux (i.e. ensemble des postes présents dans l'année).
 - Pour la valeur ajoutée / PIB
 - Ventilation de la valeur ajoutée brute par branche (en valeur) en 88 postes
 - Tableau des entrées intermédiaires en 38 postes.

Des inputs quantitatifs-qualitatifs issus du travail d'analyse

Les deux parties précédentes permettent d'apporter des éléments de compréhension de l'impact des mathématiques en France : débouchés des licences et masters de mathématiques, poids par profession, etc.

Les PCS françaises (415) ne correspondant pas directement aux SOC (Standard occupational classification) britanniques (350), nous affectons les professions au plus proche.

De même, nous avons ajusté à la marge les pourcentages de l'impact des mathématiques par PCS, voire de manière plus significative sur certaines catégories d'emplois.

L'approche quantitative

- Identification des professions directement impactées par les mathématiques (formation en ou par les mathématiques, production et application d'outils ou de recherches en mathématiques)
- Attribution de ces professions dans les différents secteurs économiques
- Application d'un modèle Input-Output pour calculer emploi et valeur ajoutée attribuable à la mobilisation des mathématiques.



B. Matrice des professions et catégories socio-professionnelles « mathématiques » selon le poids des mathématiques dans l'occupation et le type de mathématiques mobilisées

PCS	Pondération	Catégorie
231a-Chefs de grande entreprise de 500 salariés et plus	0,05	Autres
232a-Chefs de moyenne entreprise, de 50 à 499 salariés	0,05	Autres
233a-Chefs d'entreprise du bâtiment et des travaux publics, de 10 à 49 salariés	0,05	Autres
233b-Chefs d'entreprise de l'industrie ou des transports, de 10 à 49 salariés	0,05	Autres
233c-Chefs d'entreprise commerciale, de 10 à 49 salariés	0,05	Autres
233d-Chefs d'entreprise de services, de 10 à 49 salariés	0,05	Autres
311d-Psychologues, psychanalystes, psychothérapeutes (non médecins)	0,1	Autres
331a-Personnels de direction de la fonction publique (Etat, collectivités locales, hôpitaux)	1	Autres
332b-Ingénieurs des collectivités locales et des hôpitaux	0,05	Maths avancées
333d-Cadres administratifs de France Télécom (statut public)	1	Autres
333f-Personnel administratif de catégorie A des collectivités locales et hôpitaux publics (hors Enseignement, Patrimoine)	0,05	Autres
343a-Psychologues spécialistes de l'orientation scolaire et professionnelle	0,1	Autres
311c-Chirurgiens-dentistes	0,1	Autres
311e-Vétérinaires	0,1	Autres
341a-Professeurs agrégés et certifiés de l'enseignement secondaire	0,3	Maths avancées
341b-Chefs d'établissement de l'enseignement secondaire et inspecteurs	0,1	Maths avancées
342b-Professeurs et maîtres de conférences	0,3	Maths avancées
342c-Professeurs agrégés et certifiés en fonction dans l'enseignement supérieur	0,1	Maths avancées
342d-Personnel enseignant temporaire de l'enseignement supérieur	0,1	Maths avancées
344a-Médecins hospitaliers sans activité libérale	0,1	Autres
344b-Médecins salariés non hospitaliers	0,1	Autres
344c-Internes en médecine, odontologie et pharmacie	0,1	Autres
344d-Pharmaciens salariés	1	Autres
371a-Cadres d'état-major administratifs, financiers, commerciaux des grandes entreprises	0,1	Services financiers
372b-Cadres de l'organisation ou du contrôle des services administratifs et financiers	1	Services financiers
373a-Cadres des services financiers ou comptables des grandes entreprises	1	Services financiers



373c-Cadres des services financiers ou comptables des petites et moyennes entreprises	1	Services financiers
374c-Cadres commerciaux des grandes entreprises (hors commerce de détail)	0,05	Autres
376a-Cadres des marchés financiers	1	Services financiers
376b-Cadres des opérations bancaires	1	Services financiers
376c-Cadres commerciaux de la banque	1	Services financiers
376d-Chefs d'établissements et responsables de l'exploitation bancaire	0,05	Services financiers
376e-Cadres des services techniques des assurances	1	Services financiers
380a-Directeurs techniques des grandes entreprises	1	Autres
381c-Ingénieurs et cadres de production et d'exploitation de l'agriculture, la pêche, les eaux et forêts	1	Maths avancées
382b-Architectes salariés	0,5	Maths avancées
382c-Ingénieurs, cadres de chantier et conducteurs de travaux (cadres) du bâtiment et des travaux publics	1	Maths avancées
382d-Ingénieurs et cadres technico-commerciaux en bâtiment, travaux publics	1	Maths avancées
383b-Ingénieurs et cadres de fabrication en matériel électrique, électronique	1	Maths avancées
383c-Ingénieurs et cadres technico-commerciaux en matériel électrique ou électronique professionnel	1	Maths avancées
384b-Ingénieurs et cadres de fabrication en mécanique et travail des métaux	1	Maths avancées
384c-Ingénieurs et cadres technico-commerciaux en matériel mécanique professionnel	1	Maths avancées
385b-Ingénieurs et cadres de fabrication des industries de transformation (agroalimentaire, chimie, métallurgie, matériaux lourds)	1	Maths avancées
385c-Ingénieurs et cadres technico-commerciaux des industries de transformations (biens intermédiaires)	1	Maths avancées
386d-Ingénieurs et cadres de la production et de la distribution d'énergie, eau	1	Maths avancées
386e-Ingénieurs et cadres de fabrication des autres industries (imprimerie, matériaux souples, ameublement et bois)	1	Maths avancées
387a-Ingénieurs et cadres des achats et approvisionnements industriels	0,05	Maths avancées
387b-Ingénieurs et cadres de la logistique, du planning et de l'ordonnancement	1	Maths avancées
387c-Ingénieurs et cadres des méthodes de production	1	Maths avancées
387d-Ingénieurs et cadres du contrôle-qualité	1	Maths avancées



387e-Ingénieurs et cadres de la maintenance, de l'entretien et des travaux neufs	1	Maths avancées
387f-Ingénieurs et cadres techniques de l'environnement	0,04	Maths avancées
388e-Ingénieurs et cadres spécialistes des télécommunications	1	Maths avancées
389a-Ingénieurs et cadres techniques de l'exploitation des transports	1	Maths avancées
389b-Officiers et cadres navigants techniques et commerciaux de l'aviation civile	1	Autres
471b-Techniciens d'exploitation et de contrôle de la production en agriculture, eaux et forêts	1	Autres
472c-Métreurs et techniciens divers du bâtiment et des travaux publics	1	Autres
472d-Techniciens des travaux publics de l'Etat et des collectivités locales	1	Autres
473c-Techniciens de fabrication et de contrôle-qualité en électricité, électromécanique et électronique	1	Autres
474c-Techniciens de fabrication et de contrôle-qualité en construction mécanique et travail des métaux	1	Autres
475b-Techniciens de production et de contrôle-qualité des industries de transformation	1	Autres
476b-Techniciens de l'industrie des matériaux souples, de l'ameublement et du bois	1	Autres
477a-Techniciens de la logistique, du planning et de l'ordonnancement	1	Autres
477b-Techniciens d'installation et de maintenance des équipements industriels (électriques, électromécaniques, mécaniques, hors informatique)	1	Autres
477d-Techniciens de l'environnement et du traitement des pollutions	0,04	Autres
479b-Experts de niveau technicien, techniciens divers	1	Autres
485a-Agents de maîtrise et techniciens en production et distribution d'énergie, eau, chauffage	1	Autres
543b-Employés qualifiés des services comptables ou financiers	1	Services financiers
388a-Ingénieurs et cadres d'étude, recherche et développement en informatique	1	Informatique
388b-Ingénieurs et cadres d'administration, maintenance, support et services aux utilisateurs en informatique	1	Informatique
388c-Chefs de projets informatiques, responsables informatiques	1	Informatique
388d-Ingénieurs et cadres technico-commerciaux en informatique et télécommunications	1	Informatique
478a-Techniciens d'étude et de développement en informatique	1	Informatique
478b-Techniciens de production, d'exploitation en informatique	1	Informatique
478c-Techniciens d'installation, de maintenance, support et services aux utilisateurs en informatique	1	Informatique
478d-Techniciens des télécommunications et de l'informatique des réseaux	1	Informatique
544a-Employés et opérateurs d'exploitation en informatique	1	Informatique
342f-Directeurs et chargés de recherche de la recherche publique	1	Maths



		avancées
342g-Ingénieurs d'étude et de recherche de la recherche publique	1	Maths avancées
342h-Allocataires de la recherche publique	1	Maths avancées
372a-Cadres chargés d'études économiques, financières, commerciales	1	Services financiers
381b-Ingénieurs et cadres d'étude et développement de l'agriculture, la pêche, les eaux et forêts	1	Maths avancées
382a-Ingénieurs et cadres d'étude du bâtiment et des travaux publics	1	Maths avancées
383a-Ingénieurs et cadres d'étude, recherche et développement en électricité, électronique	1	Maths avancées
384a-Ingénieurs et cadres d'étude, recherche et développement en mécanique et travail des métaux	1	Maths avancées
385a-Ingénieurs et cadres d'étude, recherche et développement des industries de transformation (agroalimentaire, chimie, métallurgie, matériaux lourds)	1	Maths avancées
386b-Ingénieurs et cadres d'étude, recherche et développement de la distribution d'énergie, eau	1	Maths avancées
386c-Ingénieurs et cadres d'étude, recherche et développement des autres industries (imprimerie, matériaux souples, ameublement et bois)	1	Maths avancées
471a-Techniciens d'étude et de conseil en agriculture, eaux et forêts	1	Maths avancées
473b-Techniciens de recherche-développement et des méthodes de fabrication en électricité, électromécanique et électronique	1	Maths avancées
474b-Techniciens de recherche-développement et des méthodes de fabrication en construction mécanique et travail des métaux	1	Maths avancées
475a-Techniciens de recherche-développement et des méthodes de production des industries de transformation	1	Maths avancées
479a-Techniciens des laboratoires de recherche publique ou de l'enseignement	1	Maths avancées



C. Entretiens

ADOC TALENT MANAGEMENT	Amandine BUGNICOURT
ALCATEL-LUCENT – Bell Labs	Jean-Luc BEYLAT
ALSTOM	Robert PLANA
ANR	Jean-Yves BERTHOU, Xavier ANTOINE
AREVA	Annalisa AMBROSO
CEA	Jacques SEGRE
CEMOSIS	Christophe PRUDHOMME
CMAP, POLYTECHNIQUE	Grégoire ALLAIRE
CONSEIL EUROPEEN DE LA RECHERCHE	Jean-Pierre BOURGUIGNON
CREDIT AGRICOLE	Jean-Michel LASRY
Ecole Normale supérieure	Stéphane MALLAT
EDF R&D	René AÏD
EXPLORA NOVA	Christophe RANGER
FEDERATION CHARLES HERMITE	Pierre VALLOIS
FRANCE DIGITALE	Marie EKELAND
GDF SUEZ	Paul PONCET
ICIAM	Maria ESTEBAN
IFP ENERGIES NOUVELLES	Tran QUANG HUY
Inria	Antoine PETIT
INS2I	Michel BIDOIT
INSIS	Jean-Yves MARZIN
INSMI	Christoph SORGER
INSTITUT CAMILLE JORDAN	Simon MASNOU
INSTITUT DE MATHÉMATIQUES DE BORDEAUX	François CLAUTIAUX
INSTITUT DE MATHÉMATIQUES DE TOULOUSE	Raphael LOUBERE
LABORATOIRE DE PROBABILITES ET MODELES ALEATOIRES	Dominique PICARD
LABORATOIRE JACQUES-LOUIS LIONS	Benoît PERTHAME
LIMAGRAIN	Cédric LOI
MAIMOSINE	Stéphane LABBE
MICHELIN	Patrice HAURET
MINES PARISTECH	Pierre ROUCHON
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE	Mark ASCH
MUQUANS	Bruno DESRUELLE
NATIXIS	Michel CROUHY
POLLEN	Johann FOUCHER
ROQUETTE	Jean-Marc CORPART
SAFRAN (SNECMA)	Jérôme LACAILLE
SCENION	Guilhem TOURNIAIRE
SOCIETE FRANCAISE DE STATISTIQUE	Anne GÉGOUT-PETIT
ST MICRO ELECTRONICS	Éric BERNIER
THALES	Jean-François MARCOTORCHINO
TOTAL	Peppino TERPOLILLI
VILMORIN	Jean-Paul GUINEBRETIERE





D. Bibliographie

- Academic Ranking of World Universities (2014)
- ADOC, La poursuite de carrière des docteurs récemment diplômés en Île-de-France (2014)
- AMIES, La poursuite de carrière des docteurs récemment diplômés en IDF, Résultats pour les docteurs en Mathématiques (2015)
- APEC, Quel job avec mon diplôme? Mathématiques et mathématiques appliquées (2013)
- ARP, Enquête sur les mathématiques au cœur de l'innovation industrielle (2009)
- Australian Academy of Science, The importance of advanced physical and mathematical sciences to the Australian economy (2015)
- Bourguignon Jean-Pierre, « Un nouvel âge d'or pour les mathématiques en entreprise ? » (2014)
- CEA - Le calcul haute performance au CEA
- CDEFI, L'insertion professionnelle des ingénieurs diplômés en 2013 (2014)
- CDEFI, Les effectifs des écoles d'ingénieurs 2012-2013 (2013)
- CNE, Les formations supérieures en mathématiques orientées vers les applications (2002)
- CNRS, 2013 : une année avec le CNRS - Données chiffrées et indicateurs (2014)
- CNRS, Livre blanc - Calcul intensif (2012)
- CNRS, Rapport de conjoncture 2010, Section 01 du CNRS (2010)
- Commissariat général à la stratégie et la prospective - Analyses des Big Data : quels usages, quels défis ? (2013)
- Commission Européenne - DG Connect, Mathematics for Digital Science (Opportunities and Challenges at the Interface of Big Data, High-Performance Computing and Mathematics) (2014)
- Conseil scientifique IREM, Les mathématiques en IUT (2010)
- Deloitte, Mathematical sciences and their value for the Dutch economy (2014)
- Deloitte, Measuring the Economic Benefits of Mathematical Science Research in the UK (2010)
- Direction générale pour l'enseignement supérieur et l'insertion professionnelle, Programme de mathématiques des brevets de technicien supérieur (2013)
- ESF, « Forward Look » - Mathematics and Industry Success Stories (2011)
- ESF « Forward Look » - Mathematics & industry (2010)
- FSMP & RDMath IdF Success Stories, Quelle carrière fait-on avec un Doctorat en mathématiques?
- IDC, Creating Economic Models Showing the Relationship Between Investments in HPC and the Resulting Financial ROI and Innovation (2012)
- INSMI, Rapport de prospective du CS (2014)
- INSMI, L'INSMI en chiffres (2011)



INSMI-CNRS, Les interactions pluridisciplinaires des mathématiques, Rapport de P. Dehornoy et al. (2010)

McKinsey, Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity (2011)

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, Open Data

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, Rapport 2013 : l'état de l'emploi scientifique en France (2014)

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, Repères et références statistiques sur les enseignements, la formation et la recherche (2014)

National Research Council, The Mathematical Sciences in 2025 (2013)

National Research Council, Fueling Innovation and Discovery: The Mathematical Sciences in the 21st Century (2012)

Platform Wiskunde Nederland, Mathematical Sciences in the Netherlands (2013)

Rapport de l'Observatoire des sciences et des techniques, Indicateurs de sciences et de technologies (OST) (2010)

SIAM, Report on Mathematics in Industry (2012)

SMAI, Rapport de prospective sur les mathématiques appliquées et industrielles (2008)

SMAI, Livre blanc sur la valorisation dans l'industrie du diplôme de docteur en mathématiques appliquées (2011)

Mallat Stéphane, Big data cherche mathématiques (2013)

Teratec, La simulation haute performance au service de la compétitivité des entreprises (2013)



E. Glossaire

AMIES : Agence pour les mathématiques en interaction avec l'entreprise et la société

ANR : Agence nationale de la Recherche

BTS : Brevet de Technicien Supérieur

CIFRE : Conventions Industrielles de Formation par la Recherche

CIR : Crédit-Impôt Recherche

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

CNU : Conseil national des universités

DMS : Division of Mathematical Sciences

DUT : Diplôme Universitaire de Technologie

ECMI : European Consortium for Mathematics in Industry

EMS : European Mathematical Society

ESF : European Science Foundation

EU-MATHS-IN : European Service Network of Mathematics for Industry and Innovation

FMJH : Fondation Mathématique Jacques Hadamard

FSMP : Fondation Sciences Mathématiques de Paris

FUI : Fonds Unique interministériel

H2020 : Programme cadre européen Horizon 2020

HPC : High Performance Computing

IHP : Institut Henri Poincaré

Inria : Institut National de Recherche en Informatique et Automatique

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

INSMI : Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions

MESR : Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche

MSO : Modélisation, Simulation, Optimisation

NSF : National Science Foundation

OST : Observatoire des Sciences et des Techniques

PIB : Produit intérieur brut

PME : Petites et Moyennes Entreprises

R&D : Recherche et Développement

SATT : Société d'Accélération du Transfert de Technologie