

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

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

Synthèse



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





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 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

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)



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*

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.

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



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)) 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.





SYNTHESE DE L'ETUDE

LE PANORAMA DE LA RECHERCHE ET DE LA FORMATION EN MATHÉMATIQUES : QUALITÉ ET DIFFUSION DES MATHÉMATIQUES EN TANT QUE DISCIPLINE ACADEMIQUE

La recherche française en mathématiques fondamentales et appliquées est reconnue mondialement, mais encore indirectement représentée dans les grands programmes nationaux et européens

La recherche publique française est en pointe sur un grand nombre de disciplines tant fondamentales qu'appliquées. On recense aujourd'hui 4 000 chercheurs et enseignants-chercheurs⁹ en mathématiques au sein de plus de 60 laboratoires nationaux, dont les travaux sont mondialement reconnus. Avec 8,5% des publications en mathématiques les plus citées à 2 ans¹⁰ dans le monde en 2012, 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%). Les mathématiques apparaissent 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 mathématiques sont néanmoins indirectement représentées au sein des programmes européens et nationaux

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, Energie, 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 (NSF)* américaine flèche directement des programmes et des opportunités de financement vers les mathématiques.

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

Les collaborations et les liens entre la recherche publique et le monde socio-économique s'opèrent selon des modalités très variées – création de start-ups, recherche contractuelle et partenariale, laboratoires communs, chaires industrielles, etc. - et on estime qu'environ 10% des chercheurs en mathématiques entretiennent des relations régulières avec les entreprises.

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.



Néanmoins, les relations directes avec l'industrie, dans le cadre de collaborations contractuelles, restent encore peu significatives. On estime la part des ressources contractuelles privées dans le budget consolidé d'un laboratoire moyen entre 1% et 5%. Par comparaison, on peut estimer à 4%¹¹ la part des contrats de recherche passés avec des entreprises pour l'ensemble des ressources des opérateurs publics de recherche. Si plusieurs laboratoires de recherche en mathématiques dépassent ce seuil, la plupart d'entre eux reste en-deçà.

La relation recherche-entreprise manque encore de structuration : les laboratoires disposent de peu de moyens humains dédiés pour animer et entretenir les relations avec les entreprises ; la communauté académique est traditionnellement peu tournée vers l'industrie ; les collaborations avec le secteur privé sont également freinées par les difficultés que rencontrent les PME à formuler leurs problématiques en termes mathématiques ; le caractère très contraignant des appels à projets collaboratifs de type ANR, H2020 ou FUI fragilise cette relation ; les compétences académiques, technologiques et instrumentales de la communauté mathématique manquent de lisibilité au niveau national.

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 pourraient être plus fortement mobilisés.

Sur le dernier point, 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 en particulier 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 destiné à permettre de 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.

Au-delà, des événements et initiatives sont également organisés pour favoriser le lien industrie-recherche par AMIES, les Laboratoires et Laboratoires d'excellence en Mathématiques, les sociétés savantes, la FSMP... Cette dynamique est à poursuivre.

La diffusion des mathématiques dans l'éducation, quant à elle, est large et fournit des compétences attendues par le monde professionnel

Les effectifs étudiants (Master et Doctorat) en mathématiques sont stables pour une discipline de formation qui pèse relativement peu : on estime à 2,1% la proportion des étudiants de Master dont les Mathématiques sont la discipline principale. Ils étaient 6 600 inscrits en 2012-2013. 43 écoles doctorales sont habilitées à délivrer un Doctorat en Mathématiques¹². En 2012-2013, elles comptaient dans leurs rangs près de 2 000 inscrits, soit 2,9% des effectifs des formations doctorales.

¹¹ Projet de Loi de finance 2015. Extrait du bleu budgétaire de la mission : Recherche et enseignement supérieur

¹² Mention « Mathématiques et leurs interactions »



Les mathématiques ont en revanche un poids important dans d'autres formations des niveaux Bac+2 à Bac +8 : la formation par les mathématiques¹³ 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 qui mobilisent fortement les mathématiques. Par ailleurs, 56% des effectifs en DUT, 10,4% des effectifs en BTS et 1,2% des effectifs en Licence Professionnelle sont formés par les mathématiques.

S'agissant des formations d'ingénieur, dans l'ensemble des cours dispensés, les mathématiques pèsent pour environ 16% des enseignements de première année, 10% des enseignements de deuxième année et 6% des enseignements de troisième année.

Au global, **on peut ainsi estimer à 25% la proportion des effectifs étudiants inscrits en BTS, DUT, licence professionnelle, école d'ingénieurs, Master ou Doctorat** qui sont formés en mathématiques et par les mathématiques (ceci représente environ 2,1 millions de personnes en activité, formées en ou par les mathématiques au cours des 35 dernières années).

Ces diplômés ont une excellente insertion professionnelle.

Des débouchés vers le secteur privé pour les étudiants formés en Mathématiques qui bénéficient principalement aux étudiants de Master

Les diplômés de Master en mathématiques travaillent le plus souvent dans le secteur privé alors que c'est la tendance inverse pour les docteurs (75% d'entre eux travaillent dans la recherche publique et l'enseignement¹⁴). 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.

IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES DES MATHÉMATIQUES : POIDS DES MATHÉMATIQUES DANS L'EMPLOI ET LE PIB FRANÇAIS

Les mathématiques en France impactent directement 9% des emplois en 2012. Ceci représente environ 2,4 millions d'emplois. La valeur ajoutée apportée par les mathématiques en France représente 285 milliards d'euros sur 1 878 milliards d'euros¹⁵, soit 15% du PIB.

Le nombre de postes¹⁶ impactés directement par les mathématiques en France s'élève à 3,8 millions sur 43,3 millions soit 9% du nombre total de postes¹⁷, 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, soit **10% de l'emploi total en 2010** (une étude équivalente au Pays-Bas fait état de 11% des emplois impactés par les mathématiques).

¹³ La formation par les mathématiques est entendue ici comme la formation par des enseignements mobilisant significativement les mathématiques (plus de 4h hebdomadaires)

¹⁴ Estimation réalisée à partir d'une étude sur l'insertion professionnelle des docteurs en mathématiques en Ile-de-France : AMIES, La poursuite de carrière des docteurs récemment diplômés en IDF, Résultats pour les docteurs en Mathématiques (2015)

¹⁵ hors TVA, douanes et impôts, subventions

¹⁶ L'étude CMI, fondée sur la même approche que celle retenue par l'étude menée par Deloitte au Royaume-Uni, 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.

¹⁷ Derniers chiffres disponibles auprès de l'INSEE (2012)



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).

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.

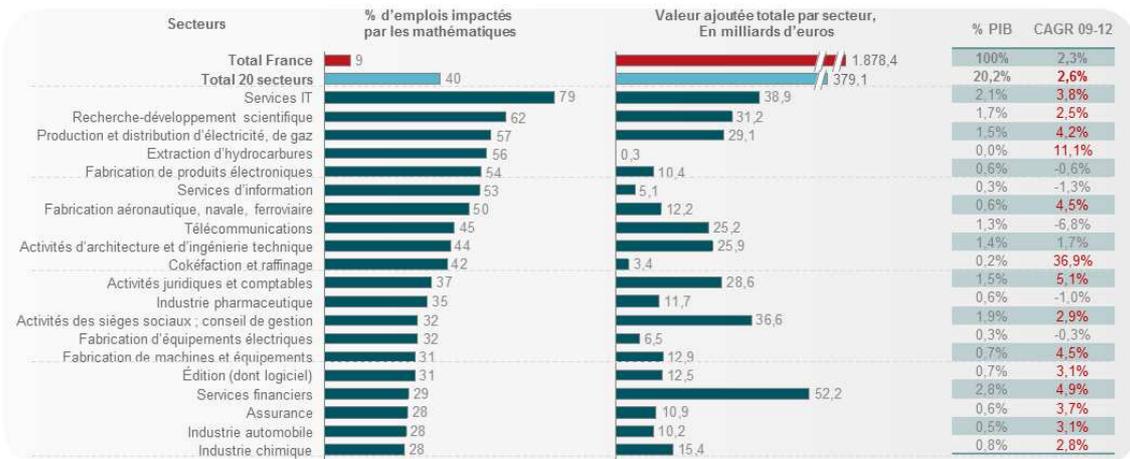
Le cumul de l'emploi impacté par les mathématiques dans ces régions est supérieur au cumul de l'emploi total (42,3%). C'est en particulier le cas pour l'Ile-de-France, qui concentre 38,4% de l'emploi mathématique vs 24,5% de l'emploi total.

La **valeur ajoutée apportée par les mathématiques en France** représente **285 milliards d'euros** sur 1 878 milliards d'euros¹⁸. 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 9,5%. 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.¹⁹

Les 20 secteurs les plus contributeurs en termes d'emploi impacté par les mathématiques 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. Ces secteurs représentent 70% de l'emploi impacté par les mathématiques (vs 50% du total des emplois)

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



¹⁸ hors TVA, douanes et impôts, subventions

¹⁹ 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.



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

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

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

Les professions directement impliquées dans la production et l'application de la recherche en sciences mathématiques et des outils mathématiques représentent 1,1 million de postes, soit près de 30% des postes impactés par les mathématiques et 2,6% de l'emploi total. Ces professions tirent la croissance du nombre d'emplois directement impactés par les mathématiques vers le haut, avec +1,5% de taux de croissance annuel moyen entre 2009 et 2012.

Le top 5 des secteurs les plus contributeurs sont, dans l'ordre :

- L'enseignement
- La recherche-développement scientifique
- Les activités d'architecture et d'ingénierie ; les activités de contrôle et d'analyses techniques
- Les travaux de construction spécialisés et la 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**.

CONTRIBUTION ET DIFFUSION DES MATHÉMATIQUES : QUELS IMPACTS SUR LE DÉVELOPPEMENT DES ENTREPRISES ? QUELS MODES D'INTEGRATION DES COMPÉTENCES MATHÉMATIQUES ?

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 ci-dessus, **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.

Au-delà de la croissance qu'elles contribuent à générer, les mathématiques avancées contribuent à la compétitivité française. Dans les secteurs qui les mobilisent, elles sont essentielles pour le développement de 44% des technologies clés²⁰ reconnues comme des leviers stratégiques pour la compétitivité des entreprises : **sur les 85 technologies répertoriées, 37 voient leurs progrès conditionnés de façon significative par des progrès dans le domaine mathématique.**

²⁰ Ministère de l'Industrie, Etude prospective « Technologies clés à l'horizon 2015 » (2010)



Un rôle essentiel des mathématiques dans le développement industriel 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.

Cette contribution passe notamment par la mobilisation, dans de nombreux secteurs d'activité, de 5 grands champs de compétences stratégiques, fondés, intégralement ou partiellement²¹, 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.

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 et 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, en modélisation et simulation numérique...

L'internalisation des compétences mathématiques au sein des entreprises se décline également sous des formes très variées : recrutement ciblé de docteurs ou ingénieurs-docteurs en mathématiques, experts pointus dans leur domaine ; recrutement d'ingénieurs dotés de compétences mathématiques avancées, capables de comprendre les modèles développés par les experts et de les utiliser de manière pertinente ; utilisation d'outils embarquant des mathématiques avancées.

²¹ Ces champs de compétences mobilisent également l'informatique et la physique et d'autres domaines scientifiques liés à leurs champs d'applications (biologie, chimie, etc.)



Les compétences mathématiques sont 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.). Cette mobilisation pourrait s'accroître dans les années à venir. Par exemple, dans « Un nouvel âge d'or pour les Mathématiques en entreprise ? », Jean-Pierre Bourguignon fait référence 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 du nombre de recrutements ciblés, en particulier sur le profil **data analytics**. D'où l'émergence de campagnes de recrutement de « mathématiciens », pour les nouveaux métiers de « *data scientists* » ou le montage de nouvelles équipes en statistiques et modélisation, en bio-statistiques.

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

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

Ce qui prévaut semble être la combinaison d'un **savoir-faire très pointu dans une spécialité** et la capacité **d'investigation aux interfaces**. La distinction ne se fait pas nécessairement au niveau des formations elles-mêmes. Elle se fait au niveau des qualités développées telles que l'autonomie, la compétence en gestion de projet, la capacité d'encadrement et de travail en équipe ...

C'est en particulier le cas pour les grands groupes. Cette caractéristique est renforcée dans les entreprises où R&D et opérations industrielles sont fortement liées, les ingénieurs en R&D intervenant notamment directement sur la conception des projets industriels et la fabrication.

La tendance est différente dans les PME : paradoxalement, alors que les PME entrent moins facilement dans une relation de recherche contractuelle et sont plus éloignées des laboratoires académiques que ne le sont les grands groupes, elles font plus facilement appel à des profils universitaires, intégrés dans l'entreprise dans le cadre de premiers emplois (post-doc notamment) ou dans le cadre d'un contrat CIFRE sur des projets ciblés.

Une contribution et un potentiel de plus en plus objectivés 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'Énergie (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), des 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, de France ou de 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)

Ceci 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

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 encore les personnels recrutés sur des compétences mathématiques qui soient identifiés, répertoriés, comptabilisés et suivis comme spécialistes du champ mathématique.

Par ailleurs, dans la majorité des contextes, les compétences mathématiques, si elles restent utiles, sont de moins en moins utilisées au cours de la carrière des mathématiciens : ceux-ci s'orientent vers des fonctions managériales ou évoluent vers des postes de chefs de projet, en R&D, perdant le contact quotidien avec les mathématiques.

Ceci 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.

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.



CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES POUR RELEVER LES DEFIS DE DEMAIN : CONNAISSANCE, INNOVATION ET COMPETITIVITE

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 14.