

LES INTERACTIONS PLURIDISCIPLINAIRES DES MATHÉMATIQUES

PATRICK DEHORNOY

avec la collaboration de

PHILIPPE BESSE, VALÉRIE BERTHÉ, PATRICIO LEBŒUF, MARC MASSOT,
GUY MÉTIVIER, FRÉDÉRIC PATRAS
INSMI-CNRS

(septembre 2010)

RÉSUMÉ. Ce texte présente un panorama des interactions pluridisciplinaires où sont engagés les mathématiciens des laboratoires de l'INSMI. L'analyse repose sur une enquête effectuée au début de l'année 2010, et propose des données à la fois quantitatives et qualitatives. Le principal message est que les interactions jouent aujourd'hui un rôle très important, mettant en jeu environ un cinquième des mathématiciens français.

Le but de ce texte est de démontrer, données à l'appui, que les mathématiciens français de 2010 interagissent avec les chercheurs des autres disciplines, et d'apporter quelques éléments concrets sur la façon dont ces interactions s'organisent.

Contexte et objectifs. Partout dans le monde, les interactions pluridisciplinaires des mathématiques se développent. L'inter- et la pluridisciplinarité sont des axes stratégiques du CNRS et font partie des sujets sur lesquels l'INSMI¹ est attendu. Il était donc utile de faire un point sur l'étendue et la diversité des interactions des mathématiques, et c'est l'objet de ce texte, qui analyse des données recueillies lors d'une enquête dans les laboratoires de mathématiques français.

Cette étude ne prétend ni à la complétude, ni à l'exhaustivité : elle repose sur des données déclaratives et ne concerne que les recherches impliquant les UMR² relevant de l'INSMI. Les collaborations de mathématiciens d'autres organismes comme l'INRIA³, l'INRA⁴, ou le CEA⁵ n'y apparaissent pas ou que de façon indirecte. Néanmoins, nous pensons que la photographie délivrée est représentative de la réalité du terrain.

La principale conclusion de cette étude est que les interactions des mathématiques avec les autres disciplines sont beaucoup plus développées qu'on ne le pense en général : entre 20 et 25% des mathématiciens de la communauté sont directement concernés par des interactions pluridisciplinaires. L'ampleur des interactions se mesure à la fois sur le nombre de collaborations recensées (plus de 1000), le nombre de publications (plus de 1100), le nombre de thèses (plus de 300), le tout sur une période de quatre ans. Tous les domaines scientifiques sont concernés, sauf la chimie qui est très peu citée. La faiblesse relative du nombre de réponses dans le secteur des sciences humaines et sociales ne reflète peut-être pas bien la réalité. Toutes les

¹Institut National des Sciences Mathématiques et de leurs Interactions

²Unités mixtes de recherche

³Institut national de recherche en informatique et automatique

⁴Institut National de Recherche Agronomique

⁵Commissariat à l'énergie atomique

mathématiques ne sont pas directement concernées, mais tous les grands domaines ont un secteur d'interaction.

On peut espérer que cette étude aide à la fois à donner à l'extérieur de la communauté mathématique un aperçu des compétences des mathématiciens français, avec quelques détails en termes de spécialités et de localisation géographique et, en même temps, serve à l'intérieur de cette communauté à identifier quels sont les champs bien explorés et quels sont ceux où beaucoup reste à construire, au moins dans certains secteurs.

Plan. Ce texte est organisé comme suit : une première section regroupe des données globales concernant les effectifs mis en jeu, les organismes partenaires, la répartition disciplinaire et géographique des interactions. Ensuite, cinq sections sont consacrées à une analyse plus fine des données correspondant à cinq grands secteurs disciplinaires, à savoir l'informatique (section 2), le secteur mécanique–ingénierie–géosciences (section 3), le secteur physique–chimie–astronomie (section 4), les sciences du vivant (section 5), et, enfin, les sciences humaines et sociales (section 6).

1. ANALYSE GLOBALE

1.1. Mode opératoire et biais. L'enquête d'où proviennent les données a été réalisée dans l'ensemble des laboratoires dont l'INSMI est tutelle entre novembre 2009 et février 2010. Le recensement a porté sur toutes les collaborations nouées depuis 2006 entre des mathématiciens de ces laboratoires et des partenaires d'autres disciplines. Un prétraitement a éliminé les collaborations terminées qui n'avaient mené à aucune publication, thèse, ou programme ANR, soit environ 15% des collaborations recensées. Les interactions prises en compte sont donc les collaborations effectuées entre 2006 et 2009 et sanctionnées par au moins une publication, thèse, ou programme ANR, ainsi que toutes les collaborations en cours au 1er janvier 2010.

Comme on l'a dit plus haut, cette étude ne prétend ni à l'exactitude, ni à l'exhaustivité. D'abord, la qualité des données recueillies a varié suivant les laboratoires, certains s'étant prêtés au jeu avec plus de zèle que d'autres. Il doit donc être entendu dès le départ que toutes les données quantitatives doivent être prises avec précaution. Ensuite, le passage par les laboratoires de l'INSMI a écarté du champ de l'enquête les enseignants-chercheurs mathématiciens non rattachés à une structure CNRS, donc en particulier les personnels des équipes d'accueil en université et école d'ingénieur, pourtant certainement engagés dans des interactions.

De même se trouve omise ou sous-évaluée au moins une partie des activités mathématiques d'interface développées par des chercheurs, mathématiciens ou non, appartenant à des laboratoires relevant d'autres instituts du CNRS ou d'autres organismes (CEA, INRIA, INSA, INSERM⁶, ...). D'une façon générale, un biais de cette enquête est d'ignorer les interactions entre mathématiciens et partenaires d'autres disciplines qui se déroulent entièrement à l'intérieur d'une seule structure, soit un laboratoire de mathématiques où sont affectés des non-mathématiciens, soit un laboratoire d'une autre discipline où sont affectés des mathématiciens : on rappelle qu'une trentaine de chercheurs CNRS de mathématiques (soit environ 10% de l'effectif) sont affectés dans des laboratoires d'autres disciplines, et qu'un nombre équivalent de chercheurs non-mathématiciens sont affectés dans des laboratoires de mathématiques.

⁶Institut national de la santé et de la recherche médicale

Autre limite de l'exercice, un certain nombre d'options sont discutables, voire arbitraires, notamment les regroupements disciplinaires et les choix de mots-clés et de domaines. Dans un souci d'homogénéité et d'équilibre, cinq grands secteurs ont été retenus : informatique, mécanique–ingénierie–géosciences, physique–chimie–astronomie, sciences du vivant (biologie, santé, écologie), et sciences humaines et sociales. Certains domaines se trouvent ainsi morcelés et leur image globale en est brouillée : c'est le cas notamment pour le traitement de l'image, partagé entre les secteurs informatique (algorithmes de traitement) et sciences du vivant (imagerie médicale), et pour l'hydrodynamique, partagée un peu arbitrairement entre les secteurs mécanique–ingénierie–géosciences (mécanique des fluides) et physique–chimie–astronomie (milieux dilués et plasmas). D'une façon générale, la position du calcul scientifique est floue : présent en tant que tel dans le secteur informatique, il est aussi indispensable comme vecteur d'interaction dans presque tous les autres secteurs, et son importance globale apparaît mal. Noter que les interactions ont été triées en fonction du secteur auquel se rattache le thème scientifique exploré, et non nécessairement celui auquel les collaborateurs extérieurs sont institutionnellement rattachés : une collaboration entre mathématiciens et informaticiens pour développer un modèle de glace est ici rattachée à la physique statistique dans le secteur physique–chimie–astronomie, et pas au secteur informatique.

1.2. Effectifs et production. Au total, 1002 interactions ont été recensées (et retenues suivant les critères ci-dessus), mettant en jeu 778 mathématiciens (sans répétition) et 1752 chercheurs d'autres disciplines. Ce chiffre inclut à la fois des chercheurs permanents et des chercheurs non-permanents, et il est peu précis. Néanmoins, quand on le rapproche de l'effectif total d'environ 3000 chercheurs en poste permanent dans les laboratoires de l'INSMI, on peut déduire que **près d'un cinquième des mathématiciens français** ont été impliqués dans une collaboration interdisciplinaire au cours des quatre dernières années.

En moyenne, une interaction met en jeu 1,4 mathématicien et 1,7 partenaire non mathématicien. Comme on pouvait s'y attendre, les mathématiciens impliqués dans au moins une interaction participent fréquemment à plus d'une interaction, en moyenne 1,8. La table 1 donne quelques précisions sur la répartition par secteur. On y voit que les caractéristiques dépendent peu du secteur, sauf en sciences humaines et sociales où les collaborations ont des effectifs moindres : en moyenne, une interaction met en jeu seulement 1,05 mathématicien et 1,5 partenaire non mathématicien. À l'opposé, c'est dans le secteur des sciences du vivant que les collaborations ont l'effectif le plus important, en moyenne 1,6 mathématicien et 1,9 partenaire non mathématicien.

Les 1002 interactions retenues ont mené sur la période de référence à la production de 1594 publications, à savoir 1122 articles de revue et 475 proceedings. Rapproché d'une production totale d'environ 8000 à 10000 publications pour l'ensemble des mathématiciens français durant la même période, ce chiffre corrobore la proportion d'un cinquième déjà rencontrée pour les effectifs. La table 2 donne les détails par secteur. À nouveau, on y constate que les chiffres sont comparables d'un secteur à l'autre pour le taux moyen de publication par interaction recensée, lequel varie de 1,3 pour les sciences humaines à 1,8 pour l'informatique. Lorsqu'on rapporte les publications au nombre de mathématiciens impliqués, on note une valeur plus faible dans le secteur physique, avec seulement 1,6 publication par mathématicien, tandis que tous les autres secteurs font apparaître une moyenne comprise entre 2

	Interactions recensées	Mathématiciens (sans répétition)	Mathématiciens (avec répétition)	Chercheurs partenaires
Informatique	192	167	267	368
Mécanique	223	170	339	348
Physique	180	155	252	316
Sciences du vivant	278	212	439	529
Sciences humaines	129	74	136	191
Total	1002	778	1433	1752

TABLE 1. Effectifs impliqués dans des interactions avec les autres disciplines

et 2,3. On note également de grandes variations dans l'importance relative des proceedings par rapport aux articles de revue, faible en physique (13% du total) et, au contraire, forte en informatique (39%) : ceci est conforme aux usages respectifs des disciplines.

	Articles	Proceedings	Total	Moyenne par interaction	Moyenne par mathématicien
Informatique	207	134	341	1,8	2,0
Mécanique	239	110	349	1,6	2,1
Physique	219	34	253	1,4	1,6
Sciences du vivant	337	144	481	1,7	2,3
Sciences humaines	120	50	170	1,3	2,3
Total	1122	472	1594	1,6	2,0

TABLE 2. Publications liées à des interactions avec les autres disciplines

L'encadrement ou le co-encadrement de doctorants est un aspect important des partenariats d'interaction. Toujours sur la période 2006–2009, l'enquête a recensé 315 thèses. En rapprochant ce nombre du total d'environ 400 thèses de mathématiques par an, on trouve à nouveau un rapport de l'ordre du cinquième pour le pourcentage de thèses liées à une interaction. La table 3 montre que les pratiques diffèrent assez suivant les secteurs : alors que 43% des interactions du secteur mécanique–ingénierie–géosciences donnent lieu à un encadrement de thèse, ce sont seulement 23% des interactions en physique–chimie–astronomie et 21% des interactions en sciences humaines qui le font, les secteurs des sciences du vivant et de l'informatique étant en position intermédiaire avec des pourcentages respectifs de 30% et 35%.

Finalement, on a également recensé les programmes ANR et analogues (ACI, ERC) liés à des interactions. Ceci ne constitue pas en soi une production, l'acceptation d'un projet ANR étant seulement un label de qualité. Néanmoins, il n'est pas

inintéressant de constater que 189 programmes ANR (acceptés) ont été mentionnés, à comparer au chiffre d'environ 180 programmes ANR de mathématiques financés entre 2006 et 2010.

	Thèses	Moyenne par interaction	Programmes ANR et analogues
Informatique	38	0,35	40
Mécanique	95	0,43	39
Physique	41	0,23	35
Sciences du vivant	84	0,30	58
Sciences humaines	27	0,21	17
Total	315	0,31	189

TABLE 3. Thèses et programmes ANR liés à des interactions avec les autres disciplines

1.3. Répartition par discipline. L'analyse secteur par secteur sera développée dans les sections suivantes, et on se limite ici à quelques remarques générales. La première est la relative concentration des domaines d'interaction. On pourra certes constater qu'il n'existe presque aucune discipline sans interaction avec les mathématiques mais, dans les faits, les domaines où la collaboration est intense sont relativement peu nombreux. Les seuls domaines où plus de cinquante interactions ont été recensées sont la mécanique des fluides (74 interactions) et l'informatique théorique (65), suivis ensuite par l'épidémiologie (49), la génomique-génétique (48), la mécanique du solide (42), les sciences de l'ingénieur (42), l'imagerie médicale (41), et la physique théorique et quantique (40) — mais, pour tous les chiffres de ce type, on n'oubliera pas que le découpage en domaines comporte une bonne part d'arbitraire.

A l'autre extrémité, s'il n'est pas très étonnant que peu d'interactions aient été recensées dans le domaine des disciplines artistiques (5 interactions en tout), voire de la géographie (12), il est plus surprenant de constater que des champs entiers comme l'astronomie (7 interactions en tout) ou la chimie (8 interactions) donnent lieu à aussi peu de collaborations. Par ailleurs, à l'intérieur même des secteurs les plus souvent impliqués, certains domaines restent peu souvent cités : par exemple, dans le secteur mécanique-ingénierie, 8 interactions seulement concernent l'automatique et le contrôle, tandis qu'en informatique, seules 12 interactions au total mentionnent la fouille de données et l'optimisation, et pas davantage la théorie du signal, trois domaines pourtant très vastes. Du côté de la physique, la théorie de la relativité-cosmologie a suscité seulement 14 collaborations (dont aucune pour la théorie des cordes), et, du côté des sciences du vivant, la pharmacologie et la dynamique des populations n'apparaissent pas très souvent (respectivement 7 et 13 interactions). Comme on l'a dit plus haut, ces chiffres faibles proviennent en partie des biais de l'enquête, mais il est également probable qu'il existe encore de nombreuses possibilités d'interaction non explorées.

Par contraste, on peut noter l'intérêt récent pour les thèmes liés à l'environnement, avec 16 interactions recensées en écologie (ici rattachée au secteur des sciences du vivant) et 29 en développement durable (rattaché au secteur des sciences humaines).

1.4. Organismes partenaires. Les organismes d'appartenance des partenaires des interactions sont multiples. Dans 50% des cas, un autre institut du CNRS est impliqué, la figure 1 indiquant la répartition suivant les instituts : comme on pouvait s'y attendre, les instituts apparaissant le plus souvent sont l'INS2I⁷ (informatique), l'INP⁸ (physique), suivi de l'INSIS⁹ (ingénierie) et de l'INSB¹⁰ (biologie). L'INSU¹¹ (univers) et l'INEE¹² (environnement) sont moins concernés, l'INC¹³ (chimie) et l'IN2P3¹⁴ (physique nucléaire) n'apparaissant qu'à la marge.

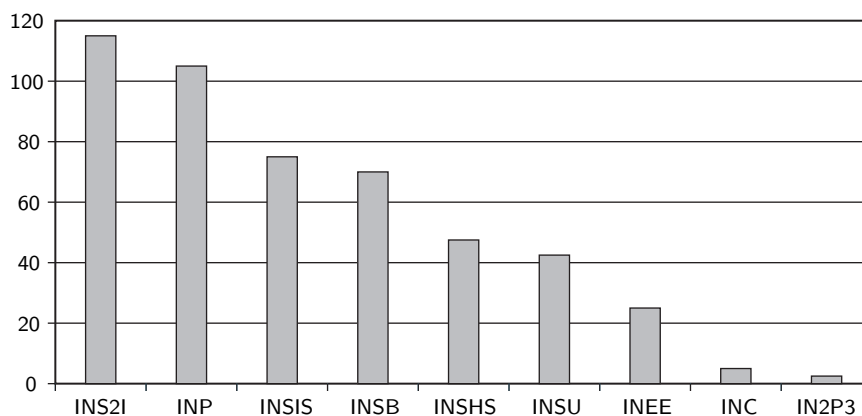


FIGURE 1. Interactions avec les autres instituts du CNRS

D'autres partenaires français interviennent dans environ 30% des cas, non exclusifs des précédents, puisque certaines interactions impliquent des partenaires multiples. Les organismes concernés sont nombreux. Comme l'illustre la figure 2, les principaux sont, par ordre décroissant, les partenaires industriels (représentant 17% du total de ces partenariats), puis l'INRIA, l'INRA, le CEA, l'INSERM, les partenaires hospitaliers (CHU), les écoles d'ingénieur, l'IFP¹⁵, l'ONERA¹⁶, l'IFREMER¹⁷,

⁷Institut des sciences informatiques et de leurs interactions

⁸Institut de physique

⁹Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes

¹⁰Institut des sciences biologiques

¹¹Institut national des sciences de l'univers

¹²Institut écologie environnement

¹³Institut de chimie

¹⁴Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

¹⁵Institut français du pétrole

¹⁶Office national d'études et recherches aérospatiales

¹⁷Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

puis la DGA¹⁸, l'EHESS¹⁹, l'Institut Curie, l'INED²⁰, l'IRCAM²¹, l'ANDRA²², le BRGM²³, CDF²⁴, Météo-France.

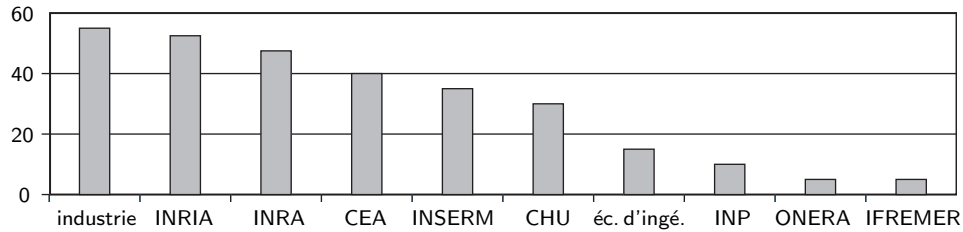


FIGURE 2. Interactions avec d'autres organismes français

Des partenaires étrangers sont impliqués dans environ 19% des cas. La carte de la figure 3 montre la répartition par zone géographique et par secteur disciplinaire. On note la prépondérance des USA (21% du total), puis des pays européens voisins (Italie 11%, Grande Bretagne 9%, Allemagne 8%, Bénélux 5%, Suisse 5%, Espagne 4%). À l'autre extrémité, on note la faiblesse des interactions mettant en jeu l'Asie (seulement 4 interactions mentionnent le Japon, 2 la Chine, et 3 le reste de l'Asie), l'Amérique latine (10 interactions) et l'Afrique (12 interactions, dont 5 au Maghreb).

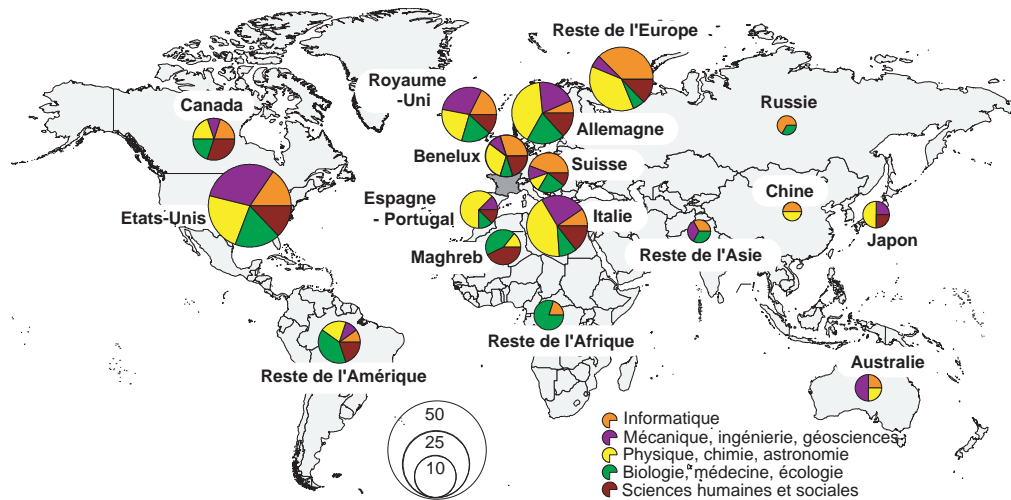


FIGURE 3. Interactions mettant en jeu des partenaires étrangers ; noter la part importante de la physique et, par contraste, la part relativement faible du secteur biologie-santé

¹⁸Direction générale de l'armement

¹⁹Ecole des hautes études en sciences sociales

²⁰Institut national d'études démographiques

²¹Institut de recherche et coordination acoustique/musique

²²Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

²³Bureau de recherches géologiques et minières

²⁴Charbonnages de France

Comme illustré dans la table 4, l'importance relative des partenariats CNRS – autres organismes français – étranger, qui est globalement de 50% – 30% – 20%, se retrouve presque à l'identique dans chaque secteur disciplinaire. Les seules variations significatives concernent le secteur physique–chimie–astronomie, où les partenariats CNRS approchent 60% tandis que les autres partenariats français tombent à 17% et, à l'opposé, le secteur des sciences du vivant où les partenariats CNRS sont seulement de 39% tandis que les autres partenariats français montent à 48% : ceci s'explique aisément par le rôle spécifique joué par l'INSERM pour la santé et l'INRA pour l'agronomie. On pourra aussi noter que la part des partenariats étrangers est spécialement importante en physique, et spécialement faible en sciences du vivant.

	CNRS	Autres organismes français	Partenaires étrangers
Informatique	53	30	18
Mécanique	55	28	16
Physique	59	17	29
Sciences du vivant	39	48	13
Sciences humaines	51	26	21
Global	50	32	19

TABLE 4. Place des différents partenaires par secteur disciplinaire, en pourcentages (la somme ne fait pas nécessairement 100 à cause des partenariats multiples)

1.5. Répartition géographique. Les variations régionales sont assez fortes, tant en données absolues qu'en données relatives par rapport aux effectifs des laboratoires concernés, voir la figure 4. En chiffres globaux, à côté de l'Île de France dont la prépondérance n'est pas surprenante, le fait plus significatif est la prédominance des régions méridionales, Provence–Alpes–Côte d'Azur (Marseille et Nice), Rhône–Alpes (Lyon et Grenoble), et, dans une mesure un peu moindre, Aquitaine (Bordeaux et Pau), Midi–Pyrénées (Toulouse) et Languedoc–Roussillon (Montpellier). Ensuite, mais en retrait, arrivent des régions au fort potentiel scientifique général, comme la Bretagne (Rennes), l'Alsace (Strasbourg), et le Nord–Pas de Calais (Lille).

Lorsqu'on rapporte les chiffres à l'effectif des chercheurs présents dans la région, la tendance reste la même, avec une domination encore renforcée pour Provence–Alpes–Côte d'Azur et Languedoc–Roussillon, mais aussi l'apparition d'une forte densité d'interactions dans des régions aux effectifs totaux plus modestes, comme la Haute Normandie (Rouen), le Centre (Orléans et Tours), et le Limousin (Limoges).

Pour ce qui est de la répartition entre les grands blocs disciplinaires, on note un équilibre général : sur la carte de la figure 4, peu de disques sont monocolores, indiquant que les interactions portent en général sur plusieurs domaines. Naturellement, la plupart des régions ont des domaines de prédilection : sciences du vivant, informatique, et physique en Provence–Alpes–Côte d'Azur, mécanique–ingénierie,

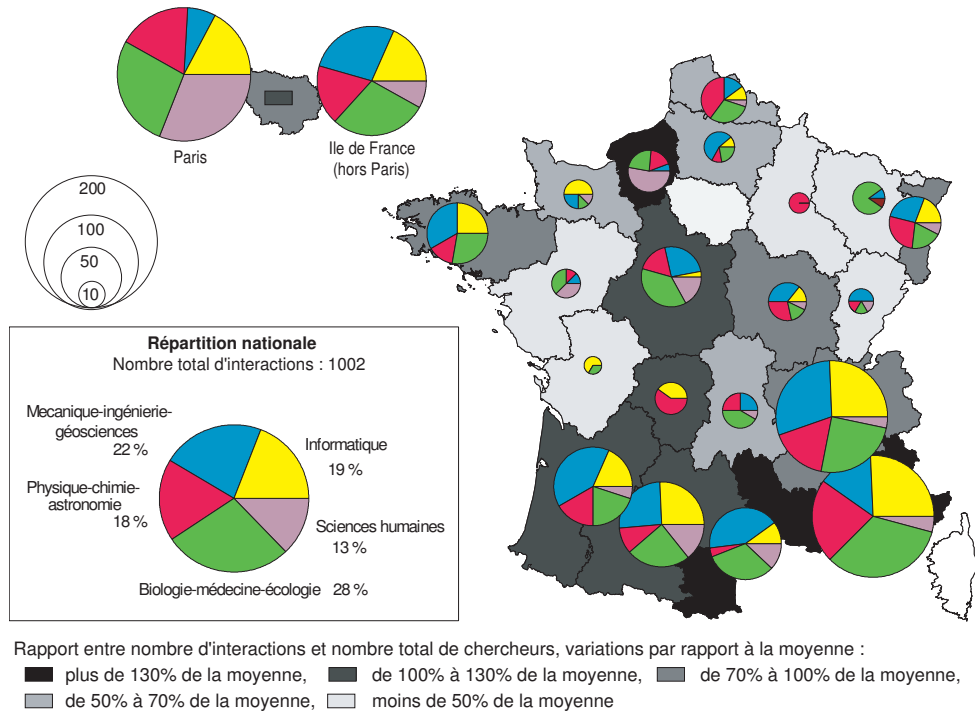


FIGURE 4. Répartition régionale des interactions entre les mathématiques et les autres disciplines : la taille des disques représente le nombre total d'interactions recensées pour la région concernée, avec une ventilation entre cinq grands domaines, la couleur de fond des régions représente le rapport entre le nombre d'interactions et l'effectif total des chercheurs de mathématiques de la région. Noter la forte prédominance des régions méridionales à côté de l'Île de France.

informatique, et sciences du vivant en Rhône-Alpes et Aquitaine, sciences humaines à Paris intra muros, physique et sciences du vivant dans le Nord-Pas de Calais, etc.

1.6. Types de mathématiques. Tous les types de mathématiques sont mis en jeu dans les interactions avec les autres disciplines. Une analyse vraiment détaillée étant difficile faute de précisions, on se contentera de distinguer quatre types : mathématiques discrètes (algèbre, combinatoire), mathématiques continues (analyse, équations aux dérivées partielles), méthodes numériques, et probabilités-statistique. Il est entendu que la frontière entre mathématiques continues et méthodes numériques est particulièrement floue et les rattachements qui en découlent sont donc un peu arbitraires.

La table 5 rassemble les données par secteur thématique. De façon non surprenante, on constate que les mathématiques discrètes sont prépondérantes dans les interactions avec l'informatique, que les méthodes numériques sont majoritaires

dans les interactions avec le secteur mécanique–ingénierie–géosciences, que les interactions avec la physique mettent surtout en jeu des mathématiques continues et, enfin, que la théorie des probabilités et les méthodes statistiques sont prépondérantes dans les interactions avec les sciences du vivant et les sciences humaines.

	Mathématiques discrètes	Mathématiques continues	Méthodes numériques	Probabilités et statistique
Informatique	61	11	15	13
Mécanique	0	34	54	13
Physique	10	62	14	13
Sciences du vivant	2	34	11	53
Sciences humaines	6	19	5	58
Global	15	33	21	30

TABLE 5. Type de mathématiques mis en jeu dans les interactions suivant les domaines thématiques concernés, en pourcentage

2. INTERACTIONS AVEC L'INFORMATIQUE

On se concentre maintenant sur les interactions dont le thème scientifique relève de l'informatique. Il faut remarquer que les contours de l'étude sont particulièrement flous dans ce cas, la proximité des secteurs et l'interconnexion des communautés faisant que des travaux d'interface mathématiques–informatique sont souvent effectués soit par des mathématiciens seuls, soit par des informaticiens seuls, auxquels cas ils échappent à cette enquête.

2.1. Répartition par domaine, mots-clés. À l'intérieur du secteur informatique, le plus grand nombre d'interactions recensées (63, soit 33% du total du secteur) concerne l'informatique théorique, où des mots-clés revenant fréquemment sont *théorie des langages*, *automates*, *théorie des graphes*, *combinatoire*, et, dans une moindre mesure, *complexité algorithmique* et *géométrie algorithmique*. Ensuite viennent le calcul scientifique (38 interactions, soit 20% du secteur) avec la programmation et le développement logiciel, où des mots-clés sont *grille*, *clustering*, *recuit simulé*, *calcul parallèle*, *contrôle symbolique*, puis la cryptographie (33 interactions, soit 18%), où il est question de *cryptographie à clé publique*, *cryptographie elliptique*, *codes correcteurs d'erreur*, etc. Le traitement de l'image représente 33 interactions, soit à nouveau 18%, avec comme mots-clés *segmentation*, et encore *restauration*, *ondelettes* du côté des méthodes continues et *géométrie discrète* du côté des méthodes discrètes.

À l'opposé, les autres domaines de l'informatique, comme le traitement du signal (12 interactions seulement), la fouille de données (7 interactions), et l'optimisation (6 interactions), sont l'objet de peu de collaborations avec des mathématiciens.

2.2. Organismes partenaires. Pour ce qui est du CNRS, les interactions avec l'informatique passent presque toutes par l'INS2I. Pour les autres partenaires, l'INRIA intervient dans 50% des cas, suivis des partenaires industriels (17%), du CEA (15%), et des écoles d'ingénieur (12%). Les partenaires étrangers sont surtout situés dans les pays européens limitrophes.

2.3. Répartition géographique. Comme le montre la carte de la figure 5, les interactions entre mathématiciens et informaticiens se concentrent sur quelques régions où elles occupent une place importante : Provence-Alpes-Côte d'Azur (Marseille, Nice) et Rhône-Alpes (Lyon, Grenoble), puis, dans une moindre mesure, Midi-Pyrénées (Toulouse), Aquitaine (Bordeaux), puis Bretagne (Rennes) et Alsace (Strasbourg). Par contre, ce type d'interaction est complètement absent de plusieurs régions où pourtant existent de forts laboratoires de mathématiques. Cette situation est assez spécifique à l'informatique et peut paraître surprenante.

Lorsqu'on considère une répartition disciplinaire plus fine, les effets de spécialisation sont encore plus nets : l'informatique théorique est dominante en Provence-Alpes-Côte d'Azur avec 63% du total des interactions avec l'informatique et à Paris (54%), et importante en Rhône-Alpes (29%) et Île de France (29%), la cryptographie est surtout présente en Aquitaine (36%), Bretagne (33%), et Rhône-Alpes (23%), le calcul scientifique est dominant en Midi-Pyrénées (55%), important en Aquitaine (45%) et Rhône-Alpes (29%), tandis que le traitement du signal et de l'image sont une spécialité de la Bretagne (55%) et de l'Île de France y compris Paris (48%).

Domaine par domaine, on retrouve cette hétérogénéité, mais à des degrés divers : 81% des interactions en informatique théorique se concentrent sur les trois régions Île de France, Provence-Alpes-Côte d'Azur, et Rhône-Alpes. De même, 50% des interactions recensées dans le domaine du calcul et de la programmation concernent les régions Midi-Pyrénées et Rhône-Alpes, suivies dans une moindre mesure par l'Aquitaine.

La cryptographie et la théorie des codes sont répartis de façon plus uniforme, cinq régions mentionnant plus de trois interactions dans ce domaine : Provence-Alpes-Côte d'Azur, Aquitaine, Rhône-Alpes, Limousin, et Paris intra muros. Relativement discret, le traitement du signal se répartit sur plusieurs régions, dont seule la Bretagne émerge. Mieux représenté, le traitement d'image est présent dans plusieurs régions, Paris et l'Île de France représentant à elles seules 35% des interactions. En fouille de données, les quelques interactions mentionnées se situent en Île de France, et celles en optimisation concernent principalement Midi-Pyrénées.

2.4. Types de mathématiques. Le type de mathématiques le plus souvent mis en jeu dans les interactions avec l'informatique sont les mathématiques discrètes (logique, combinatoire, algèbre, combinatoire des mots, dynamique symbolique). Lorsqu'on examine domaine par domaine, cette prépondérance est extrêmement marquée en informatique théorique (89% des interactions) et en cryptographie-théorie des codes (97%). La situation est plus équilibrée pour le calcul scientifique et les logiciels (42% en mathématiques discrètes, 37% pour les méthodes numériques, 16% pour les probabilités et la statistique), et la tendance s'inverse pour le traitement du signal et de l'image (seulement 15% pour les mathématiques discrètes, contre 37% aux mathématiques continues, 28% pour les méthodes numériques, et 17% pour les probabilités et la statistique).

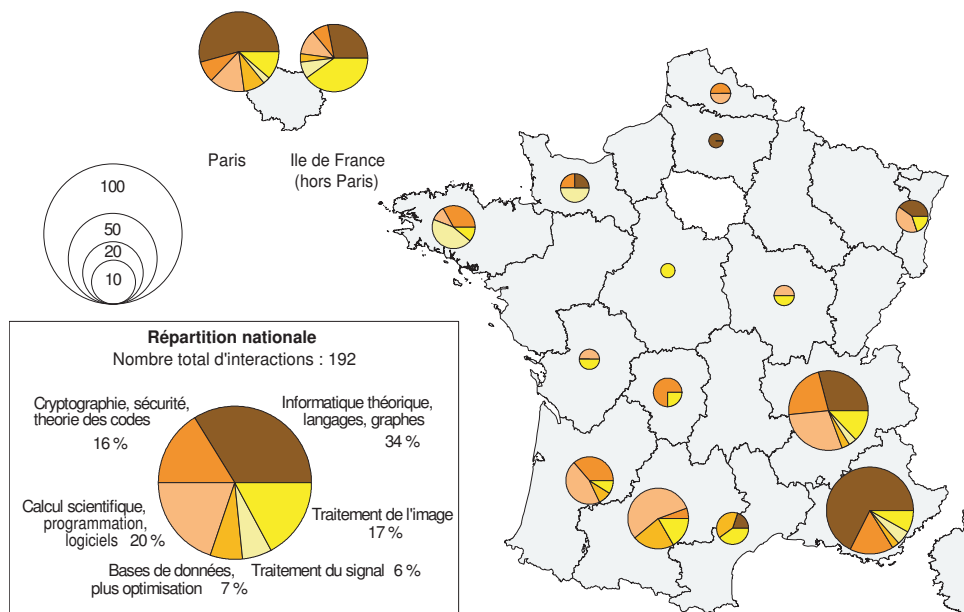


FIGURE 5. Interactions entre les mathématiques et l'informatique : noter l'importance des régions Provence-Alpes-Côte d'Azur et Rhône-Alpes, et, par contraste, le très faible nombre d'interactions dans toute la bande médiane du territoire

2.5. Commentaires. L'interface mathématiques-informatique est active et en pleine expansion. On peut noter la variété et la richesse des mathématiques impliquées, qui incluent des domaines fondamentaux comme l'arithmétique et la géométrie algébrique (cryptographie), la théorie ergodique et les systèmes dynamiques (dynamique symbolique), ou encore la topologie (topologie combinatoire et topologie computationnelle).

Cependant, même si les interactions recensées sont relativement nombreuses, il semble qu'un potentiel bien plus important pourrait être développé. Les interactions existantes reposent souvent sur quelques personnalités qui essaient autour d'elles, et il n'est donc pas douteux que davantage pourrait être fait pourvu qu'une impulsion initiale soit donnée.

Certains domaines comme le traitement du signal, ou encore la fouille de données, la recherche opérationnelle et l'optimisation, apparaissent sous-représentés. Il s'agit d'un des biais déjà signalés de cette enquête : certaines recherches relevant de l'interaction mathématiques-informatique sont effectuées prioritairement dans les laboratoires d'informatique (voire d'économie dans le cas de l'optimisation), soit par tradition, soit du fait d'une évolution récente, et elles n'apparaissent pas ici. Une évolution similaire peut être relevée pour certains domaines traditionnels d'interaction comme la théorie des graphes, la logique, ou le calcul formel, qui sont de plus en plus traités en informatique et tendent à glisser hors du spectre des laboratoires de mathématiques.

3. INTERACTIONS AVEC LE SECTEUR MÉCANIQUE–INGÉNIERIE–GÉOSCIENCES

On en vient au (vaste) secteur regroupant la mécanique, les sciences de l'ingénieur et les géosciences, auxquelles ont été ici adjointes l'océanographie et l'étude de l'atmosphère.

3.1. Répartition par domaine, mots-clés. Les interactions concernent en priorité la mécanique des fluides, avec 74 interactions recensées (33% du secteur) ; les mots-clés revenant le plus souvent sont *volumes finis, équation d'Euler, cavitation, shallow water models, vagues extrêmes, magnétohydrodynamique*. Ensuite, à égalité, viennent la mécanique des solides (42 interactions, soit 19%), avec comme mots-clés *chocs, vibrations, couches-limites, éléments finis*, et les sciences de l'ingénieur (42 interactions également), où des mots-clés sont *filtrage, problème inverse, modélisation multi-échelle, quantiles extrêmes, fiabilité*. Les géosciences, avec en particulier les interactions avec l'industrie pétrolière, concernent 33 interactions (15%), avec comme mots-clés *calcul des variations, problème inverse, valeurs extrêmes, friction fluide–solide, raffinement de maillage*.

Au-delà de ces quatre thèmes, les autres domaines sont nettement en retrait : l'océanographie ne contribue que pour 14 opérations (mots-clés : *modélisation, conditions aux limites*), l'étude de l'atmosphère, qui inclut la climatologie et la météorologie, pour 10, et l'automatique et le contrôle pour 8 : au moins dans ces deux derniers domaines, on peut penser qu'il existe un fort potentiel de développement futur non encore exploré.

3.2. Organismes partenaires. Au CNRS, les interactions des mathématiques avec le secteur mécanique–ingénierie–géosciences se répartissent entre l'INSIS (ingénierie), à hauteur de 46%, mais aussi l'INSU (univers) pour 30% des cas et l'INP (physique) pour 17% des cas, ce qui traduit la diversité du secteur. Parmi les autres partenaires français, le secteur industriel est fortement prépondérant, représentant 42% de la catégorie, suivi par le CEA (17%) et l'IFP (13%). Pour l'étranger, les collaborations avec les USA sont importantes, représentant un tiers de l'ensemble des partenariats internationaux.

3.3. Répartition géographique. Un peu moins que pour le secteur informatique mais quand même de façon très nette, les variations régionales sont fortes et les interactions avec le secteur mécanique–ingénierie–géosciences se concentrent, outre l'Île de France hors Paris (Villetaneuse, Orsay, Cachan, Marne-la-Vallée, pour 17% du total du secteur), sur les régions Rhône–Alpes (Grenoble, 16%) et Aquitaine (Bordeaux et Pau, 11%) puis, dans une moindre mesure, Provence–Alpes–Côte d'Azur (Nice et Marseille, 9%), Languedoc–Roussillon (Montpellier, 9%), Midi–Pyrénées (Toulouse, 8%), puis Paris intra muros (6%), Bretagne (Rennes, 5%), et Centre (Orléans, 4%), tandis que plusieurs régions sont totalement ou presque totalement absentes.

Lorsqu'on considère une répartition disciplinaire plus fine, les effets de spécialisation sont nets : mécanique des fluides et ingénierie représentent pour moitié chacun plus de 60% en Île de France (Paris intra muros compris), 75% en Aquitaine, 83% en Midi–Pyrénées, tandis que la seule mécanique des fluides représente 52% en Provence–Alpes–Côte d'Azur et 33% en Rhône–Alpes. La Bretagne et Paris intra muros offrent un panorama plus équilibré, tandis que Rhône–Alpes a une forte spécialité en océanographie (27% de son total).

Par domaine, on note que la mécanique du solide est répartie sur un assez grand nombre de sites (14), sans prépondérance très marquée : les régions où au moins trois interactions sont mentionnées sont Languedoc-Roussillon, Bretagne, Bourgogne, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Paris intra muros, et Franche Comté.

La situation est comparable en mécanique des fluides (13 sites), mais avec des pôles importants déjà mentionnés ci-dessus : Île de France (16% de la discipline), Rhône-Alpes (16%), Provence-Alpes-Côte d'Azur (15%), Aquitaine (12%) ; on peut encore mentionner Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon.

Assez peu d'interactions en automatique et contrôle ont été recensées (8 en tout, pour 5 sites), mais une moitié relève de la seule région Centre. Beaucoup mieux représentées, les sciences de l'ingénieur se concentrent sur 10 sites, avec une forte prépondérance de l'Île de France (28% du total), de l'Aquitaine (21%), et de Midi-Pyrénées (16%) ; les autres régions où au moins trois interactions ont été recensées sont la Bretagne et l'Auvergne.

Les géosciences concernent 10 régions, dont principalement Rhône-Alpes (21% du total). En océanographie, on a déjà noté l'importance de Rhône-Alpes, qui concentre 10 des 14 interactions recensées. En atmosphère-climatologie-météorologie, 6 régions sont impliquées, dont encore Rhône-Alpes pour un tiers du total du domaine.

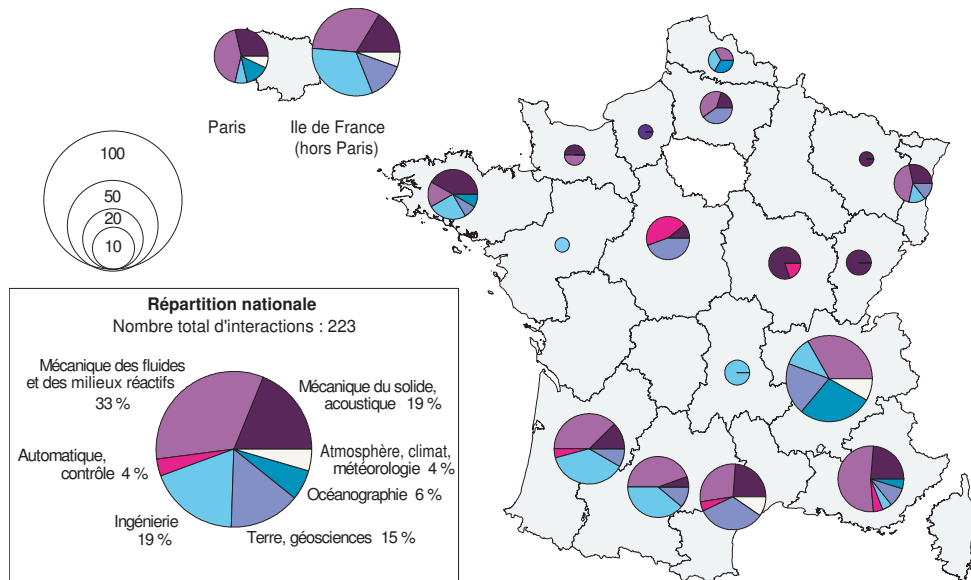


FIGURE 6. Interactions avec le secteur mécanique-ingénierie-géosciences : la répartition est plus uniforme qu'en informatique, mais la prépondérance des régions méridionales est toujours marquée

3.4. Types de mathématiques. Les mathématiques discrètes sont ici totalement absentes, alors que les méthodes numériques jouent un rôle prépondérant, spécialement en mécanique des fluides (72%), et en automatique-contrôle, ingénierie, et géosciences (environ 50% dans chacun des cas). La part des mathématiques continues (analyse) est majoritaire en mécanique des solides (52%), et d'à peu près

30% dans chacune des autres branches. La part des probabilités et des méthodes statistiques est plus faible, aux alentours de 25% en ingénierie, géosciences et océanographie, sauf en climatologie–météorologie où elle atteint 50%.

3.5. Commentaires. Le niveau global d’interaction dans ce secteur est élevé, surtout avec la mécanique et l’ingénierie. Ceci est d’autant plus le cas qu’un certain nombre d’interactions se déroulent entièrement dans le cadre de laboratoires de mécanique ou d’ingénierie et, à ce titre, n’apparaissent pas dans cette enquête. Celle-ci gagnerait à être enrichie par l’étude des retombées de la politique d’échange de postes de chercheurs entre les sections 01 et 10 du CoNRS²⁵, laquelle a mené à la présence de mathématiciens dans des laboratoires de mécanique ou d’ingénierie, et parfois à la formation d’équipes de mathématiciens dans ces laboratoires.

Par ailleurs, dans le présent rapport, les interactions dans le domaine des plasmas apparaissent majoritairement dans le secteur physique mais il faut souligner qu’une partie de l’activité se déroule dans des laboratoires d’ingénierie, notamment ce qui concerne l’hypersonique de rentrée, les torches à plasma, ou les décharges et les streamers : cette thématique est répartie entre physique et ingénierie avec une frontière parfois assez floue.

Finalement, une grande partie des interactions entre les mathématiques et le secteur mécanique–ingénierie–géosciences passe par le calcul scientifique et implique aussi les secteurs informatique et physique–chimie, comme par exemple pour le domaine de la combustion turbulente. Dans ce rapport, le calcul scientifique apparaît scindé entre, d’une part, le développement logiciel, les grilles et le calcul parallèle distribué associés à l’informatique et, d’autre part, les interactions directement applicatives associées à chaque discipline concernée, ingénierie, géosciences, physique, astrophysique, etc. Cet éclatement masque un peu l’importance des mathématiciens dans le domaine du calcul scientifique, où une interface forte est en train de se développer. Même si le phénomène, bien visible lors des appels à projet PEPS²⁶ Mathématiques–informatique–ingénierie, est difficile à quantifier ici, on peut penser que c’est à cette interface que s’opéreront les avancées critiques et les ruptures dans l’avenir.

4. INTERACTIONS AVEC LE SECTEUR PHYSIQUE–CHIMIE–ASTRONOMIE

Autre domaine d’interaction traditionnel des mathématiciens, la physique est l’objet de cette section. Par commodité, on a adjoint la chimie et l’astronomie, dont la place modeste ne saurait justifier un traitement séparé.

4.1. Répartition par domaine, mots-clés. Il existe des interactions de mathématiciens avec presque tous les domaines de la physique, mais de façon très inégale suivant les domaines. Le domaine le plus représenté est la physique théorique et quantique, avec 40 interactions (22% du secteur), où des mots-clés sont *système intégrable*, *renormalisation*, *algèbre de Hopf*, *électrodynamique quantique*, *théorie conforme des champs*, *effet Hall quantique*, *chaos quantique*. Ensuite, on trouve la physique statistique et les systèmes complexes, avec 37 interactions (20%) et des mots-clés comme *systèmes dynamiques discrets*, *modèle d’Ising*, *verre de spin*, *écoulements granulaires*, *méthode de grandes déviations*, et la physique des milieux dilués et des plasmas, avec 32 interactions (18% du secteur) et des mots-clés comme

²⁵Comité national de la recherche scientifique

²⁶Projets exploratoires pluridisciplinaires

magnétohydrodynamique, équations de Landau et de Vlasov, confinement inertiel, turbulence, flamme de diffusion, et une intense activité en liaison avec le programme ITER.

Moins importants numériquement, la physique de la matière condensée et les nanosciences concernent 21 interactions (mots-clés : *dynamique vibrationnelle, quasi-cristaux, diffraction, solitons, plasmons*), de même que l'électromagnétisme et l'électronique (mots-clés : *ferromagnétisme, interférométrie, optimisation de forme, ...*). La théorie de la relativité et la cosmologie ne concernent que 14 interactions (mots-clés : *équation d'Einstein, conjecture de Penrose, ondes gravitationnelles*).

Les interactions avec la chimie sont très peu nombreuses (8 en tout), autour de questions de modélisation et de dynamique moléculaire. De même pour les interactions avec l'astronomie (7), centrées sur l'acquisition de données avec des méthodes multiéchelles et de segmentation en grande dimension.

4.2. Organismes partenaires. Au CNRS, les interactions avec le secteur physique–chimie–astronomie passent naturellement par l'INP (physique), avec 71% du total, puis par l'INSIS (ingénierie), à hauteur de 10%, et de l'INSU (univers), à hauteur de 9%. Les autres partenaires français, dont on a souligné plus haut qu'ils jouent un rôle relativement faible, sont d'abord le CEA (52% de la catégorie), puis l'INRIA (19%). Les partenariats internationaux sont par contre très importants, surtout concentrés sur les pays européens limitrophes, Italie, Allemagne, Espagne, Grande-Bretagne, les USA ne jouant qu'un rôle relativement réduit avec seulement 17% des collaborations internationales mentionnées.

4.3. Répartition géographique. À la différence des secteurs informatique et mécanique, les interactions avec les secteurs physique–chimie–astronomie sont réparties sur presque toutes les régions, avec une prédominance de Paris intra muros (20% du total), Provence–Alpes–Côte d'Azur (18%), puis Île de France hors Paris (13%) et Rhône–Alpes (11%). Ensuite viennent Aquitaine (6%), Nord–Pas de Calais, Alsace, Midi–Pyrénées, et Centre.

La plupart des régions sont concernées par plusieurs domaines : Paris intra muros et Provence–Alpes–Côte d'Azur (Nice et Marseille) couvrent presque tous les domaines, avec cependant des spécialités, physique statistique et électromagnétisme à Paris intra muros, milieux dilués et plasmas en Provence–Alpes–Côte d'Azur (Nice et Marseille), Aquitaine (Bordeaux), et Alsace (Strasbourg), matière condensée–nanosciences en Rhône–Alpes (Lyon et Grenoble), physique théorique et quantique en Île de France (Paris, Cergy), Bourgogne (Dijon), et Rhône–Alpes (Grenoble).

Domaine par domaine, la répartition est assez dispersée. La physique théorique et quantique se retrouve sur 9 sites, dont les principaux en terme de nombre d'interactions recensées sont l'Île de France hors Paris (20% du total), Paris intra muros (17%), Rhône–Alpes (17%) et Bourgogne (13%). En relativité–cosmologie, seuls 5 sites sont concernés, dont Paris intra muros qui représente 43% du total.

La physique de la matière condensée et les nanosciences se rencontrent sur 10 sites, et seul Rhône–Alpes émerge avec 28% du total. Dix sites également pour la physique des milieux dilués et des plasmas et la physique nucléaire, dont seul Provence–Alpes–Côte d'Azur émerge avec 35%, suivi de l'Île de France hors Paris, Midi–Pyrénées, Aquitaine, Alsace, et Paris intra muros. Dix sites encore pour la physique statistique et les systèmes complexes, qui impliquent un certain nombre de laboratoires non encore mentionnés, dont une moitié à Paris intra muros et en Île

de France hors Paris, et une moitié en province, d’abord en Provence–Alpes–Côte d’Azur et dans le Centre. Huit sites pour l’électromagnétisme–électronique, dont seul émerge le Limousin.

La chimie n’apparaît que sur 5 sites, dont seule l’Aquitaine ressort avec 37% du total, mais sur un effectif trop faible pour être significatif. Enfin, l’astronomie apparaît sur 5 sites, à nouveau avec un effectif total trop faible pour en tirer des conclusions.

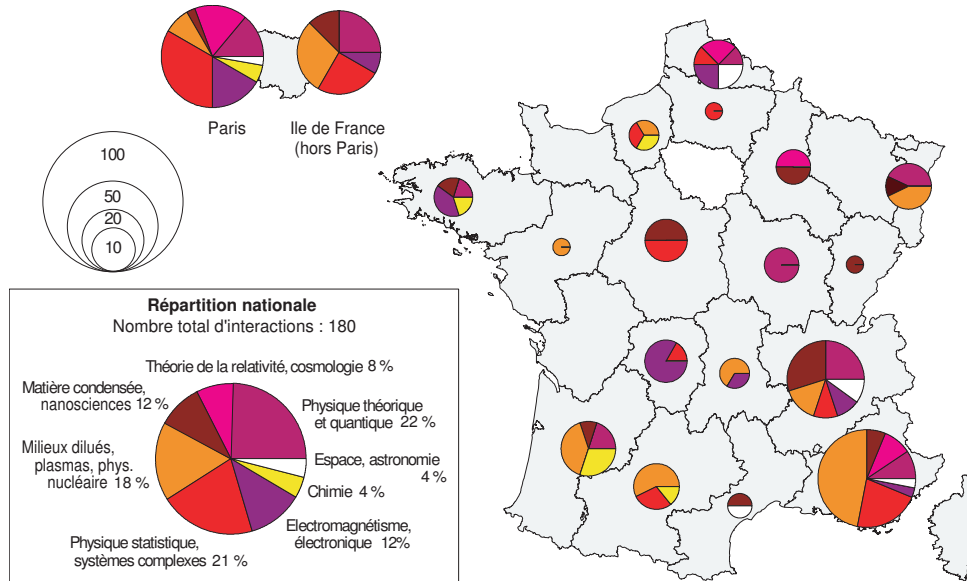


FIGURE 7. Interactions entre les mathématiques et le secteur physique–chimie–astronomie : noter la faiblesse de la chimie et de l’astronomie, la prépondérance de Provence–Alpes–Côte d’Azur et Rhône–Alpes, et la relative homogénéité de la répartition

4.4. Types de mathématiques. Les mathématiques impliquées dans les interactions avec le secteur physique–chimie–astronomie sont des mathématiques continues (analyse, EDP) : celles-ci sont hégémoniques en cosmologie (93%), majoritaires en physique quantique (73%), en physique des milieux dilués et des plasmas (67%), en électromagnétisme (62%), en physique de la matière condensée (57%), et en physique statistique (47%). Les mathématiques discrètes n’interviennent de façon significative qu’en physique statistique (28%) et en physique quantique (20%). Les méthodes numériques sont majoritaires en chimie (50%). Quant aux probabilités et aux méthodes statistiques, leur rôle est faible (moins de 15%), sauf en astronomie (57%) et en physique statistiques (25%).

4.5. Commentaires. Un des points les plus notables est la faiblesse en France des interactions entre les mathématiques et la théorie des cordes et, plus généralement, les théories cosmologiques récentes : il s’agit pourtant d’une interface naturelle, très riche et dynamique au niveau international, en particulier aux États-Unis, et

il est regrettable que davantage de contacts n'existent pas en France sur ces sujets créatifs où les deux disciplines s'enrichissent mutuellement.

Dans la même direction, on remarque la faiblesse des interactions en physique des hautes énergies et, d'une façon générale, l'absence quasi-totale d'interactions mettant en jeu l'IN2P3.

À l'opposé, on ne peut que se réjouir de l'importance des interactions en physique des plasmas, notamment autour de la magnéto-hydrodynamique où le projet ITER joue un important rôle structurant ; on peut remarquer qu'une bonne part des interactions dans ce domaine met en jeu des laboratoires de l'INSIS davantage que de l'INP, *cf.* remarques de la section 3.5.

5. INTERACTIONS AVEC LES SCIENCES DU VIVANT

Cette section est consacrée au secteur des sciences du vivant, biologie, médecine, écologie, qui sont désormais l'objet de très nombreuses interactions avec les mathématiques, principalement sur des questions de modélisation et d'analyse statistique.

5.1. Répartition par domaine, mots-clés. Avec un total de 137 interactions, la biologie représente environ la moitié des interactions du secteur. Le domaine le plus représenté est la génomique, qui concerne 48 interactions, soit 17% ; les mots-clés sont ici *modélisation multi-échelle, phylogénie, théorie du signal stochastique*. Ensuite viennent la biologie de la cellule, avec 33 interactions et des mots-clés comme *modélisation EDP, modélisation statistique, réseau génétique*, et les neurosciences, avec 22 interactions et des mots-clés comme *spiking neurons, apprentissage, synchronisation, équation de Hodgkin-Huxley*. La biologie animale et végétale, à laquelle l'agronomie a été rattachée ici, représente 21 interactions, avec comme mots-clés à nouveau *modèle markovien et modèle EDP, estimation de paramètre*. La dynamique des populations ne concerne que 13 interactions, avec comme mots-clés *modèle de mélange, modèle cinétique, stochasticité démographique*.

Le domaine médecine-santé est de taille comparable, avec un total de 125 interactions. Le domaine le plus représenté est l'épidémiologie, avec 49 interactions (18% du secteur) et des mots-clés tels que *modèles markoviens, modèles SIR, clustering* pour les mathématiques et *prion, Alzheimer, hépatite B, VIH, paludisme* pour les pathologies étudiées. L'imagerie médicale vient ensuite avec 41 interactions et des mots-clés comme *IRM, imagerie 3D, analyse de texture, statistiques de forme, segmentation, appariement de surface*. La modélisation des pathologies (souvent le cancer) concerne 28 interactions, avec des mots-clé comme *inverse scattering, modèle de croissance, modélisation EDP*. Par contre, l'évaluation des thérapeutiques et la pharmacologie ne donnent lieu qu'à un très petit nombre d'interactions (7), où revient le mot-clé *régression logistique*.

Enfin, 16 interactions concernent l'écologie et la biodiversité, avec des mots-clés comme *réaction-diffusion, agrégats spatiaux, modélisation des foules*.

5.2. Organismes partenaires. Les interactions avec les sciences du vivant ne concernent des équipes du CNRS que dans 39% des cas, ce qui est moindre que dans les autres secteurs où le pourcentage dépasse toujours 50%. Parmi ces interactions, environ 63% concernent l'INSB (biologie), mais on note aussi 8% pour l'INSHS (sciences humaines), et 7% pour l'INS2I (informatique) et l'INEE (écologie) : presque tous les instituts du CNRS apparaissent ici, ce qui illustre la diversité des possibilités d'interaction sur le thème du vivant.

Les interactions mettant en jeu d'autres organismes français sont numériquement nombreuses, puisqu'elles représentent quasiment la moitié du total du secteur, et concernent notamment le domaine de l'agronomie et de la santé. Les principaux partenaires sont l'INRA, pour 31% des cas, et l'INSERM, pour 23% des cas. Les CHU apparaissent également pour 20% de la catégorie, suivis par l'INRIA pour 11%.

Les partenariats internationaux sont relativement peu nombreux (13% du total des interactions seulement) ; le pays majoritaire est les USA, avec 19% des cas, mais les autres chiffres sont trop faibles pour être significatifs.

5.3. Répartition géographique. Comme le montre la carte de la figure 8, presque toutes les régions sont concernées par les interactions avec les sciences du vivant, qui apparaissent comme le secteur le mieux réparti à travers l'ensemble du territoire. Par ordre d'importance numérique décroissante, on trouve d'abord Paris intra muros (55 interactions recensées, soit 20% du total), puis Provence-Alpes-Côte d'Azur (17%), l'Île de France hors Paris (14%), Rhône-Alpes (11%), suivis de Midi-Pyrénées (6%), Languedoc-Roussillon (6%), Centre (5%), Aquitaine (4%), et Bretagne (3%).

Au niveau disciplinaire, on note une assez grande variété des spécialités dans les régions les plus impliquées : par exemple, les dix sous-domaines retenus sont représentées à Paris intra muros, 9 le sont en Île de France et en Provence-Alpes-Côte d'Azur, 8 en Rhône-Alpes, et 7 en Midi-Pyrénées. Ceci n'empêche pas la présence de spécialités favorites marquées, par exemple la génomique-génétique en Provence-Alpes-Côte d'Azur (44% du total des interactions de la région) et en Midi-Pyrénées (44%), l'épidémiologie à Paris intra muros (29%) et en Languedoc-Roussillon (37%), ou l'imagerie médicale en Île de France (30%).

Domaine par domaine, on retrouve cette relative équirépartition, mais à un moindre degré que dans le secteur physique-chimie-astronomie. Ainsi, la génomique-génétique avec ses 48 interactions recensées n'est présente que dans 6 régions, Provence-Alpes-Côte d'Azur représentant à elle seule 44% du total du domaine ; ensuite viennent Midi-Pyrénées, l'Île de France, et Rhône-Alpes. La biologie cellulaire est plus répartie, avec 13 sites, d'où ressortent Provence-Alpes-Côte d'Azur et Rhône-Alpes avec 18% du total chacune, puis la Bretagne et la Lorraine. Pour les neurosciences, seulement 5 régions, dont à nouveau Provence-Alpes-Côte d'Azur qui représente 36% du total et Centre. Sept régions pour la dynamique des populations, où seule émerge la région Nord-Pas de Calais. Pour la biologie animale et végétale et l'agronomie, domaine vaste, onze régions apparaissent, dont émergent l'Aquitaine (19%, principalement en agronomie) et le Languedoc-Roussillon (19%).

En médecine, le domaine de la modélisation des pathologies est présent dans 9 régions, Paris intra muros ressortant avec 32% du total, suivi par l'Île de France, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Rhône-Alpes. Pour l'imagerie médicale et le diagnostic, 11 régions sont concernées, mais avec une prépondérance écrasante de l'Île de France hors Paris et de Paris intra muros (respectivement 29% et 17% du total). L'épidémiologie apparaît dans 14 régions, avec une forte prépondérance de Paris intra muros qui représente 33% du total ; les autres régions concernées sont l'Île de France hors Paris, la Lorraine, l'Auvergne, et le Languedoc-Roussillon. Enfin la thérapeutique et la pharmacologie sont présentes dans seulement 7 régions, dont

aucune n'émerge nettement. Pour ce qui est de l'écologie, 9 régions sont concernées, à nouveau sans que l'effectif permette de déceler des concentrations remarquables.

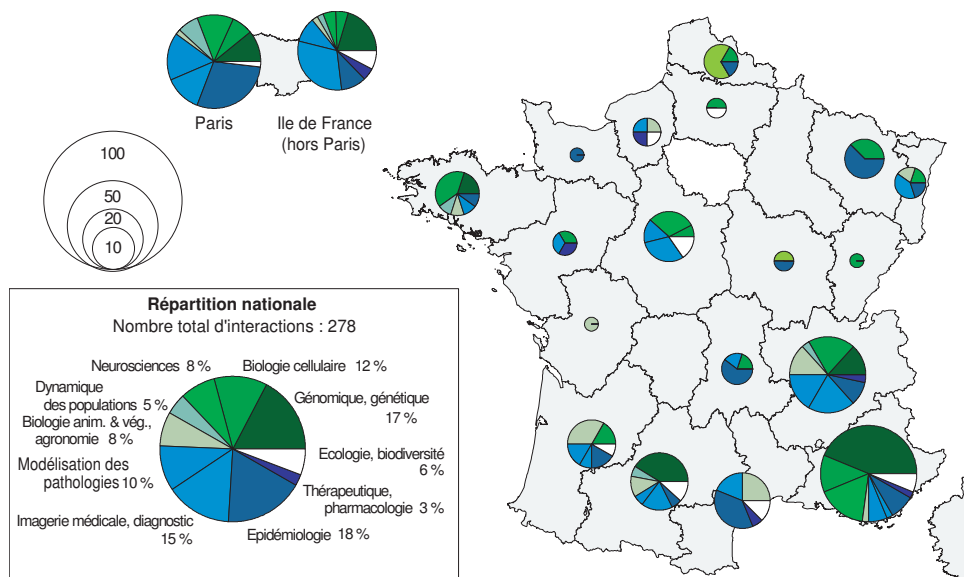


FIGURE 8. Interactions entre les mathématiques et le secteur biologie-médecine-écologie : remarquer que presque toutes les régions sont concernées (à des taux variables), et que la plupart sont concernées par un assez grand nombre de domaines différents

5.4. Types de mathématiques. Les mathématiques impliquées dans les interactions avec les sciences du vivant sont principalement les probabilités et les méthodes statistiques (53% du total) ; cette prépondérance est spécialement marquée dans plusieurs sous-domaines comme la génomique (88%), l'épidémiologie (80%), la dynamique des populations (77%), la biologie animale et végétale (75%), la thérapeutique-pharmacologie (71%). Les mathématiques discrètes sont très peu sollicitées, les mathématiques continues (équations différentielles et aux dérivées partielles) étant mises en jeu pour la modélisation en biologie cellulaire (79%), en pathologie (75%), et en neurologie (73%). Les méthodes numériques ne sont utilisées que pour l'imagerie médicale, où elles représentent 56%.

5.5. Commentaires. On peut noter que, lors d'une collaboration avec les sciences du vivant, la frontière entre mathématiques et informatique est souvent ténue, chaque discipline pouvant apporter des contributions complémentaires mais aussi répondre à des questions très similaires. Ceci se rencontre tout particulièrement au sein des projets sous le label de l'INRIA. D'une façon générale, les rôles de l'INSMI et de l'INS2I sont très comparables.

Il est important pour le futur d'identifier les verrous constituant des goulets d'étranglement ou des blocages dans le développement de la modélisation pour les sciences du vivant. À l'heure actuelle, les deux principaux, qui sont d'ordre plus méthodologique que technologique, semblent être les suivants :

- un manque culturel de relations entre disciplines ou équipes, une indifférence ou une ignorance réciproque due à des habitudes culturelles : par exemple, le biologiste habitué à ses outils (un test de Student, une équation différentielle ordinaire) peine à franchir un niveau de complexité pour aborder des modèles plus sophistiqués mais plus réalistes pour rendre compte de sa problématique et de ses expérimentations ;
- l'évolution explosive des biotechnologies : le développement des modèles accuse un net retard par rapport à l'évolution des technologies, et il faut encore lui ajouter le temps de formation des acteurs mettant en œuvre les technologies et analysant les résultats obtenus.

6. INTERACTIONS AVEC LE SECTEUR DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

On termine par le secteur des sciences humaines et sociales, qui est très divers et met en jeu des interactions de types variés. Globalement, le secteur concerne un volume d'interactions (129 au total) moindre que les quatre autres secteurs (effectifs allant de 180 à 278).

6.1. Répartition par domaine, mots-clés. De façon un peu surprenante, l'enquête n'a fait apparaître que 12 interactions dans chacun des domaines économie et finance. Dans le premier cas, il s'agit de modélisation avec des mots-clés comme *analyse convexe, optimisation, théorie des jeux*, dans le second cas, les mots-clés sont par exemple *allocation de risque, coût de transaction, transport optimal*.

Dans le groupe des sciences humaines à proprement parler, les sciences sociales, avec la sociologie et la psychologie sont les plus importantes numériquement, avec 40 interactions recensées, soit 31% de tout le secteur ; les mots-clés sont ici *statistique appliquée, équations cinétiques, systèmes complexes, détection de motif, théorie du contrôle*. Ensuite, un ensemble de 29 interactions se rattachent au thème du développement durable, avec des mots-clés comme *série temporelle, systèmes multi-agents, valeurs extrêmes, analyse de corrélation canonique*. D'autre part, 21 interactions sont recensées dans le domaine de l'histoire et de la philosophie, le thème principal étant ici l'histoire des sciences et des mathématiques.

Le panorama est complété par un petit nombre d'interactions en géographie (10), où il est question principalement de modélisation. Enfin quelques interactions (5) relèvent des disciplines artistiques, dont 3 concernent l'informatique musicale.

6.2. Organismes partenaires. Au CNRS, les interactions avec les sciences humaines et sociales concernent principalement l'INSHS (sciences humaines), pour 68% des cas, ce qui est naturel. Comme on a rattaché le développement durable à ce secteur, on trouve aussi des partenariats avec l'INEE (écologie), dans 20% des cas. Les autres partenaires français sont très divers, aucun ne ressortant de façon nette. De même, les partenariats internationaux se répartissent sur la plupart des pays européens, sans qu'aucun soit prépondérant.

6.3. Répartition géographique. Le secteur des sciences humaines est vaste et divers, et il est difficile de comparer des domaines a priori fort éloignés qui le composent. La carte de la figure 9 montre que les interactions se concentrent sur un assez petit nombre de régions, avec une domination écrasante de Paris intra muros (48% du total), suivie de l'Île de France hors Paris (9%), de Midi-Pyrénées (8%), de la Haute-Normandie (7%), puis du Centre, Provence-Alpes-Côte d'Azur, et Languedoc-Roussillon (un peu moins de 5% chacun).

A l'exception de Paris intra muros, où tous les domaines sont représentés, avec néanmoins une prépondérance des sciences sociales (36%) et de l'histoire (24%), la plupart des autres régions ne sont concernées que par deux, trois, voire quatre domaines. Ainsi, l'Île de France hors Paris est surtout concernée par la finance et l'histoire, Midi-Pyrénées par la géographie, le développement durable, l'histoire, et les sciences sociales, la Haute-Normandie et Languedoc-Roussillon par les sciences sociales et le développement durable, le Centre par les sciences sociales, Provence-Alpes-Côte d'Azur par l'économie, la géographie et les sciences sociales.

La situation domaine par domaine est assez contrastée. Pour ce qui est de l'interaction avec la finance, seulement 4 régions sont concernées, et Paris intra muros représente à lui seul 58% du total. De même, en économie, seules 7 régions apparaissent, avec Paris intra muros représentant 33% du total mais sans qu'aucun laboratoire émerge. En géographie, 5 régions sont mentionnées, sans émergence nette. Par contre, thème nouveau et porteur, le développement durable concerne 10 régions, dont ressort à nouveau Paris intra muros avec 28% du total. La situation est similaire pour les sciences sociales, où apparaissent 9 régions dont ressortent la Haute-Normandie, Paris intra muros, et l'Aquitaine. Des interactions avec l'histoire et la philosophie ont été recensées dans 4 régions, avec encore une fois Paris intra muros représentant 71% du total, mais il existe probablement une ambiguïté entre ce qui est considéré comme interne aux mathématiques ou comme relevant d'interactions, car il est certain qu'un nombre de sites beaucoup plus élevé est concerné par ces domaines. Enfin, les interactions avec les disciplines artistiques, peu nombreuses, se concentrent à Paris intra muros.

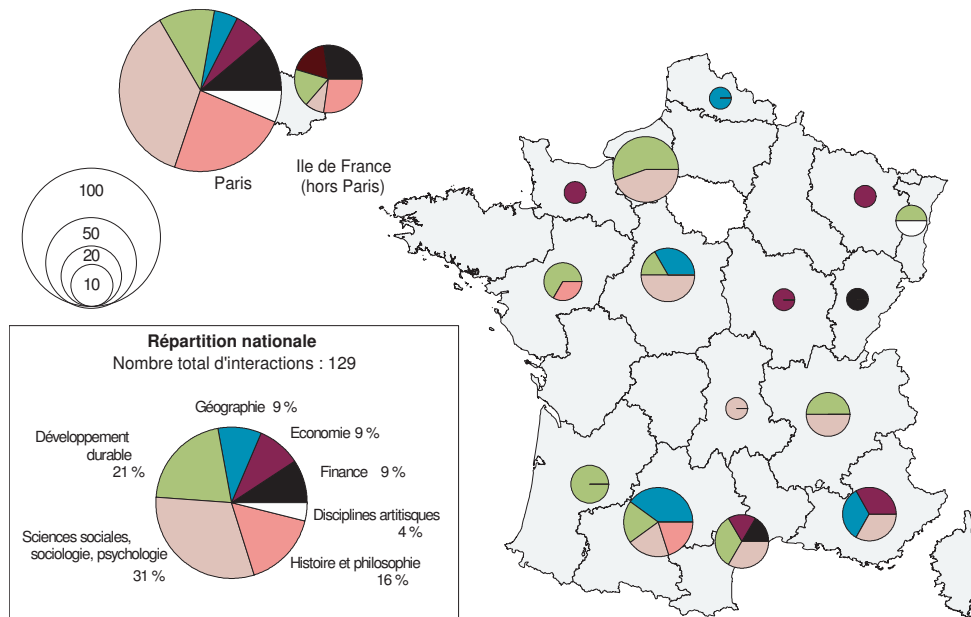


FIGURE 9. Interactions entre les mathématiques et le secteur des sciences humaines : noter la prédominance de Paris intra muros

6.4. Types de mathématiques. Les mathématiques impliquées dans les interactions avec les sciences humaines sont diverses, comme le sont les domaines concernés.

Les méthodes probabilistes jouent un rôle important dans les interactions avec l'économie (67%) et surtout la finance (83%), et les méthodes statistiques dans à peu près tous les domaines : sciences de la société (75%), développement durable (67%), géographie (42%). Les mathématiques discrètes apparaissent dans les disciplines artistiques par le biais de l'informatique musicale. Enfin, l'histoire, principalement impliquée sous la forme de l'histoire des sciences et des mathématiques, fait appel à une réflexion des mathématiques sur elles-mêmes qui échappe à la classification considérée ici, ou, si on préfère, procède d'un cinquième type de mathématiques qui lui est propre.

6.5. Commentaire. Le niveau global des interactions recensées entre mathématiques et sciences humaines et sociales paraît relativement faible et d'un ordre de grandeur plutôt décevant. Néanmoins, plus encore que dans les autres secteurs, les données brutes recueillies dans l'enquête semblent incomplètes dans ce secteur : certains des exemples les plus institutionnalisés (et, de là, les mieux financés) d'interactions entre l'INSMI et l'INSHS n'apparaissent pas dans l'enquête. Ceci concerne notamment le domaine de l'économie et de la finance, où le rôle des mathématiciens est pourtant bien établi. La dichotomie entre mathématiques financières et finance au sens des sciences humaines peut expliquer en partie ce biais qui reflète une spécificité du positionnement disciplinaire de la finance mathématique (sur laquelle il serait intéressant de réfléchir).

On note aussi l'absence dans l'enquête de certaines interactions pourtant avérées dans le domaine des sciences cognitives. De même, il semble que les interactions entre mathématiques et histoire ne prennent pas bien en compte l'histoire des sciences, alors même que, traditionnellement, plusieurs chercheurs du CNRS historiens des mathématiques relèvent de la section de mathématiques du CoNRS. L'explication de cette faible prise en compte pourrait venir du fait qu'une partie de ces recherches interdisciplinaires soit conduite entièrement dans des laboratoires ou des structures relevant de l'INSHS et, à ce titre, n'apparaissent pas dans cette enquête.

D'une façon générale, l'extrême complexité et la dispersion disciplinaire du secteur des sciences humaines et sociales sont telles qu'il serait bienvenu d'entreprendre un état des lieux disciplinaire, du droit à l'économétrie en passant par la géographie, l'histoire, etc. pour comprendre vraiment comment pourrait et devrait fonctionner une interaction entre les mathématiques et les sciences humaines, sur quels modes scientifiques, avec quelles priorités.

7. CONCLUSIONS

Comme on l'a dit, le principal intérêt de cette étude est de montrer que les interactions des mathématiques avec les autres disciplines occupent aujourd'hui une place importante dans le paysage français. Il ne s'agit évidemment pas de nier ou de minorer l'importance de mathématiques fondamentales exclusivement tournées vers le progrès de la connaissance, mais d'insister sur l'existence conjointe, concomitante, consubstantielle, de nombreuses recherches menées en collaboration avec des chercheurs d'autres disciplines, à partir de problèmes issus de ces disciplines, et orientées vers des fins qui ne sont pas exclusivement le développement en soi des mathématiques.

Parmi les points positifs, ressort l'importance du développement des interactions avec les sciences du vivant, qui concernent désormais à peu près toutes les régions et dépassent même en effectifs les interactions plus traditionnelles avec

l'informatique, la mécanique, et la physique. Parmi les points négatifs repérés²⁷, la faiblesse des interactions avec des disciplines comme la chimie, l'astronomie, ou l'économie ou, à un degré de granularité un peu plus fin, des domaines comme la fouille de données, l'optimisation, le traitement du signal, la théorie des cordes, la météorologie, l'électronique. Paradoxalement, certains de ces domaines sont très voisins des mathématiques : dans certains cas, il s'agit de domaines qui ont glissé en majorité hors du champ des laboratoires de mathématiques (par exemple la recherche opérationnelle et l'optimisation), dans d'autres cas, les recherches sont menées à la fois dans les laboratoires de mathématiques et dans ceux d'autres disciplines, avec des communautés très proches, voire concurrentes, mais des usages de publication différents, ce qui peut rendre les collaborations (spécialement les co-tutelles de thèse) difficiles à mettre en place. À l'opposé, pour des secteurs plus disjoints des mathématiques comme les sciences du vivant, la répartition des rôles est claire, et les interactions peut-être plus facilement établies. Dans tous les cas, la conclusion est qu'il existe certainement des potentiels de développement considérables.

Une des (nombreuses...) lacunes de l'enquête est de ne pas permettre d'évaluer de façon fiable la durée des collaborations établies : il est clair que les interactions sur le long terme ont une tout autre portée que de simples actions ponctuelles qui, dans le pire cas, peuvent apparaître comme un picorage au bilan discutable. Obtenir des résultats réellement marquants au niveau des applications et suggérant en retour des problèmes de mathématiques pertinents et nouveaux demande en général un investissement long et partagé, d'où l'importance des postes de chercheurs d'interface et de la constitution d'équipes pluridisciplinaires.

L'analyse proposée ici est un instantané à un moment donné, en l'occurrence le début de l'année 2010. Il serait intéressant de comparer cette photographie avec d'autres semblables à des moments différents. S'il est probablement malaisé de retrouver aujourd'hui les données pour le passé, on peut par contre espérer qu'une étude analogue pourra être menée à nouveau dans quelques années, voire que cette pratique devienne périodique, permettant ainsi de suivre en direct les évolutions thématiques et les grandes tendances.

REMERCIEMENTS

Je remercie les directeurs d'unité et toutes les personnes qui ont aidé à la collecte souvent fastidieuse des données. Je remercie également Didier Journo de l'IPAM du CNRS pour son aide dans la réalisation des cartes illustrant ce texte, Laurence Labbé pour son aide dans la manipulation des fichiers, et Élise Janvresse pour sa relecture attentive.

INSMI-CNRS

E-mail address: `patrick.dehornoy@cnrs-dir.fr`

URL: `//www.math.unicaen.fr/~dehornoy`

²⁷mais il ne faut pas oublier la non-exhaustivité des données recueillies et les biais de l'enquête