

Ce que l'interdisciplinarité fait aux disciplines. Une enquête sur la nanomédecine en France et en Californie

Séverine Louvel

► **To cite this version:**

Séverine Louvel. Ce que l'interdisciplinarité fait aux disciplines. Une enquête sur la nanomédecine en France et en Californie. *Revue française de sociologie*, Presse de Sciences Po / Centre National de la Recherche Scientifique, 2015, 56 (1), pp.75-103. 10.3917/rfs.561.0075 . halshs-01354895

HAL Id: halshs-01354895

<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354895>

Submitted on 7 Dec 2018

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

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

Ce que l'interdisciplinarité fait aux disciplines. Une enquête sur la nanomédecine en France et en Californie

Séverine Louvel

Pour citer cet article

Séverine Louvel. Ce que l'interdisciplinarité fait aux disciplines. Une enquête sur la nanomédecine en France et en Californie. *Revue française de sociologie*, 2015, 56 (1), pp.69-97

Résumé. L'essor de l'interdisciplinarité dans les sciences suscite de nombreuses interrogations quant à l'avenir des disciplines : dans quelle mesure demeurent-elles des unités centrales de différenciation des sciences ? Sont-elles amenées à disparaître ou à se recomposer sous l'effet de dynamiques scientifiques, et de pressions politiques, favorables à l'interdisciplinarité ? Cet article propose d'étudier les conséquences de la coopération interdisciplinaire sur les territoires et les frontières des disciplines. À la différence des travaux de sociologie des sciences qui abordent cette question, nous mettons moins l'accent sur les dimensions cognitives des disciplines que sur leurs dimensions sociales. En particulier, nous nous demandons dans quelle mesure l'interdisciplinarité peut représenter une ressource d'action et aider les disciplines en présence à consolider leurs institutions. Une étude empirique conduite sur la nanomédecine en France et en Californie nous amène à mettre en évidence deux éléments favorables au renforcement des territoires disciplinaires au contact de l'interdisciplinarité : d'une part, des pratiques interdisciplinaires propices au travail de démarcation vis-à-vis d'approches antérieures ou concurrentes ; d'autre part, la plasticité des frontières disciplinaires, qui autorise l'extension de la juridiction des disciplines.

Mots-clés. RECHERCHE PUBLIQUE – DISCIPLINES SCIENTIFIQUES – INTERDISCIPLINARITE – PROGRAMME DISCIPLINAIRE – POLITIQUES SCIENTIFIQUES – NANOMEDECINE

L'interdisciplinarité soulève de nombreuses questions quant au sort des disciplines académiques. Définie comme « une articulation de savoirs, qui entraîne, par approches successives, comme dans un dialogue, des réorganisations partielles des champs théoriques en présence » (De Béchillon, 1997, p. 186)¹, elle se banalise ces dernières décennies, sous l'effet conjugué de politiques publiques et de dynamiques scientifiques. Depuis la fin des années 1960, les gouvernements, mais aussi l'OCDE puis l'Union européenne, brandissent l'interdisciplinarité comme instrument de lutte contre l'académisme de la recherche publique (Weingart et Stehr, 2000) et de promotion de ses retombées socio-économiques. Ce discours politique, qui met l'accent sur une logique d'innovation (Barry, Born et Weszkalnys, 2008),

L'auteur remercie les relecteurs anonymes et le comité de rédaction de la Revue française de sociologie pour leurs critiques très pertinentes des versions précédentes de cet article. Ce texte a également bénéficié des commentaires judicieux de plusieurs collègues (notamment, Béatrice Milard, Matthieu Hubert, Thomas Reverdy et Vincent Mangematin). Qu'ils en soient ici remerciés. Enfin, l'auteur remercie l'Agence nationale de la recherche pour le financement attribué dans le cadre du projet ANR 2010 Blanc - 1811-01).

¹ D'autres auteurs donnent des définitions proches de l'interdisciplinarité (Vinck, 2000 ; Weingart et Stehr, 2000) et la distinguent tant de la pluridisciplinarité (la juxtaposition de savoirs disciplinaires dont les disciplines sortent intactes) que de la transdisciplinarité (l'intégration de plusieurs disciplines).

trouve son apogée pendant les années 1990, avec l'appel à la généralisation d'un mode de production des connaissances (dit « mode 2 ») structuré non plus autour des disciplines mais de problèmes à résoudre (le changement climatique, la lutte contre le cancer, etc.) (Gibbons *et al.*, 1994). Par ailleurs, l'interdisciplinarité se développe par une « logique ontologique » (Barry, Born et Weszkalnys, 2008) ou sous l'effet de dynamiques internes aux sciences (Lenoir, 1997 ; Dogan et Pahre, 1991 ; Bonaccorsi, 2010).

L'interdisciplinarité met-elle fin aux disciplines académiques ? La thèse d'une dissolution des frontières disciplinaires dans le « mode 2 » de production des connaissances a été critiquée pour son absence de réalisme et d'ancrage socio-historique (Godin et Gingras, 2000 ; Weingart et Stehr, 2000 ; Shinn et Ragouet, 2005). Toutefois, les modalités selon lesquelles l'interdisciplinarité transforme les disciplines, en tant qu'unités essentielles d'organisation et de différenciation des sciences contemporaines (Dubois, 2014)², restent en partie à explorer. Cette question revêt un double intérêt sociologique. D'une part, elle alimente une tradition de recherches ancienne sur l'émergence et l'évolution des spécialités et disciplines scientifiques (Lemaine *et al.*, 1976), inscrite dans un débat structurant de la sociologie des sciences quant au rôle respectif des dynamiques endogènes et exogènes dans l'institutionnalisation des sciences (Shinn et Ragouet, 2005). D'autre part, elle permet de se positionner dans la discussion relative aux attaques contemporaines contre l'autonomie des communautés scientifiques. Face à l'affirmation politique de la contribution de l'interdisciplinarité à l'économie de la connaissance, certaines disciplines s'estiment assiégées, voire sacrifiées³. Analyser les reconfigurations disciplinaires permet alors d'interroger l'équation qu'établissent promoteurs et détracteurs de l'interdisciplinarité, entre mot d'ordre politique, affaiblissement, voire disparition, de la capacité des disciplines à circonscrire les savoirs légitimes, et instrumentalisation des connaissances scientifiques.

Dans cet article, nous explorons les effets de l'interdisciplinarité sur les territoires et les frontières disciplinaires en prenant l'exemple de la nanomédecine. Désignant l'utilisation des nanotechnologies dans la médecine, ce domaine présente un double intérêt pour notre étude. Tout d'abord, les nanotechnologies suscitent des controverses entre promoteurs institutionnels prédisant la « convergence NBIC » (Nanotechnologies, Biology, Information and Communication technologies) (Roco et Bainbridge, 2002) et sociologues des sciences arguant du poids des disciplines dans les pratiques scientifiques (Schummer, 2004 ; Rafols et Meyer,

² Il existe de multiples définitions des disciplines : « La notion de “discipline” a pour elle le plébiscite des usages sans avoir celui des dictionnaires [...], la multiplicité des termes choisis pour en rendre compte frise l'incommensurable » (Blanckaert, 2006, p. 136). En particulier, les auteurs n'accordent pas le même poids à leurs dimensions cognitives et sociales. Les premières désignent un stock de ressources cognitives et instrumentales partagées par un ensemble délimité de chercheurs (Fabiani, 2006). Les secondes correspondent aux institutions qui établissent la discipline comme « un système autonome entretenant des relations particulières avec le monde extrascientifique, à savoir la technique, l'industrie, la politique et l'enseignement, qui lui permettent à la fois de se procurer des ressources et d'intéresser un public à ses réalisations » (Stichweh, 1994, p. 56). Certains auteurs considèrent que les disciplines n'ont aucune consistance cognitive (contrairement aux spécialités) (Cambrosio et Keating, 1983) et, qu'en la matière, les différences intradisciplinaires excèdent parfois les différences interdisciplinaires (Barry, Born et Weszkalnys, 2008 ; Dogan et Pahre, 1991). D'autres suggèrent que le poids de la dimension cognitive varie précisément selon les disciplines (Whitley, 1976).

³ Ce discours a été notamment porté par les sciences humaines et sociales (Conesa *et al.*, 2013).

2007 ; Marcovich et Shinn, 2011). Ensuite, l'interdisciplinarité s'y développe sous l'effet conjoint de logiques scientifiques et politiques, ce qui nécessite de circuler entre les niveaux d'analyse (laboratoires, départements, agences de financement, revues, etc.). Du point de vue scientifique, les nanotechnologies apportent à la recherche biomédicale « des outils moléculaires et une connaissance moléculaire du corps humain » (European Science Foundation, 2004)⁴ et représentent une nouvelle étape dans l'ère ouverte par la biologie moléculaire (Gaudillière, 2002). Comme cette dernière, créée par des physiciens dans les années 1940 (Morange, 1994), la nanomédecine repose sur des échanges nourris entre des biologistes et des chercheurs issus des sciences chimiques, physiques et des sciences de l'ingénieur (physicochimie, chimie, biophysique, électronique, informatique, traitement du signal, etc.). Du point de vue politique, les acteurs institutionnels voient dans l'interdisciplinarité une condition *sine qua non* de la réalisation des promesses biomédicales et marchandes que la nanomédecine génère, comme d'autres pans de la recherche biomédicale (Brunet et Dubois, 2012)⁵.

À la différence des analyses contemporaines de l'interdisciplinarité dans les sciences, nous mettons l'accent sur les transformations sociales des disciplines engagées dans la nanomédecine. En particulier, nous nous demandons dans quelle mesure l'interdisciplinarité peut bénéficier à certains programmes disciplinaires, définis comme les actions de consolidation des institutions disciplinaires (Lenoir, 1997 ; Dubois, 2014).

La première section dresse un état de l'art des travaux de sociologie des sciences qui appréhendent les effets de l'interdisciplinarité sur les disciplines. Nous montrons qu'ils relèvent d'une sociologie du travail scientifique interdisciplinaire centrée sur les dimensions cognitives des disciplines, et soulignons l'intérêt de faire porter l'analyse sur les liens entre interdisciplinarité et institutions disciplinaires. Dans une deuxième section, nous nous appuyons sur une enquête conduite en France et aux États-Unis pour exposer les pratiques et ambitions qui caractérisent l'interdisciplinarité en nanomédecine, au-delà de la grande variété des objets, méthodes et spécialités qui y contribuent. Nous montrons l'absence actuelle d'« enjeu disciplinaire », autrement dit d'intérêts à faire exister des pratiques scientifiques sous la forme d'une discipline (Cambrosio et Keating, 1983, p. 328), corrélatif au souci de valoriser la nanomédecine au sein de sa spécialité. Enfin, dans une troisième section, nous montrons comment l'interdisciplinarité sert le programme disciplinaire de spécialités des sciences chimiques, physiques et des sciences de l'ingénieur (Lenoir, 1997, p. 55). Tout d'abord, les pratiques interdisciplinaires sont particulièrement propices au travail de démarcation (Gieryn, 1983) par lequel ces spécialités distinguent leurs approches de démarches concurrentes en sciences du vivant. Apparaissant comme les détenteurs de compétences indispensables, leurs chercheurs renforcent leur position dans les programmes de formation et sur les marchés du travail académique. Ensuite, nous avançons que la plasticité de ces disciplines (Bensaude-Vincent, 2001 ; Bensaude-Vincent et Stengers, 2001 ; Ramunni, 1995) favorise une extension

⁴ Bien que des disciplines comme la biologie ou la chimie travaillent depuis des décennies à l'échelle moléculaire (Webster, 2006), un consensus s'établit sur les possibilités biomédicales qu'ouvrent les nanotechnologies.

⁵ L'Encadré 1, consacré à l'enquête conduite en France et en Californie, présente les principaux dispositifs de soutien institutionnel à la nanomédecine pour la France et les États-Unis.

de leur juridiction au domaine du vivant (Abbott, 1988), avec deux conséquences : d'une part, elles intègrent et légitiment l'étude du vivant dans leurs instruments disciplinaires, notamment dans leurs revues ; d'autre part, elles multiplient les opportunités de financement pour leurs travaux et font particulièrement bien face aux attentes reportées sur la recherche publique en matière d'innovation.

Interdisciplinarité et frontières disciplinaires : multiplication, dissolution ou recomposition ?

L'histoire et la sociologie des sciences travaillent depuis longtemps sur les liens entre interdisciplinarité et dynamiques des disciplines, dans le cadre d'un questionnement relatif à l'émergence de ces dernières. En effet, les échanges interdisciplinaires sont récurrents dans les processus historiques de différenciation et de segmentation des disciplines (Dogan et Pahre, 1991)⁶. Ces travaux débattent de la part relative des échanges intellectuels, des intérêts professionnels et des ressorts institutionnels dans l'émergence des spécialités et disciplines. Deux études devenues classiques se différencient frontalement sur ce point : Nicholas Mullins (1972) insiste sur les activités intellectuelles et sociales à l'origine de la biologie moléculaire (établissement d'un style de recherches, transformation des structures de communication et de sociabilité, formation d'étudiants). Il s'oppose explicitement à Joseph Ben-David et Randall Collins (1966), qui font principalement reposer l'essor de la psychologie expérimentale sur la structure professionnelle des disciplines-mères (physiologie et philosophie), sur leur statut relatif et les opportunités de carrière associées.

La place des disciplines dans le travail scientifique interdisciplinaire

En parallèle d'une tradition d'étude qui reste très active, en particulier en histoire des sciences, un ensemble de travaux s'intéressent à l'interdisciplinarité comme moteur de recomposition des frontières disciplinaires. S'appuyant en général sur des analyses ethnographiques du travail scientifique, ils donnent à voir des collectifs dont les frontières ne recourent pas celles des disciplines : collèges invisibles (Crane, 1972) ; arènes transépistémiques (Knorr-Cetina, 1982) ; réseaux de coopération scientifique (Vinck, 1999) ; recherches-technologies (Joerges et Shinn, 2001) ; ensembles de recherche (Hackett *et al.*, 2004) ; collectifs hybrides institutionnalisés ou informels (Dogan et Pahre, 1991). Ces analyses privilégient le projet de recherche comme unité d'analyse, à l'échelle duquel s'observent les « assemblages concrets de matériaux, techniques, instruments, idées et théories » (Hackett *et al.*, 2004) qui constituent autant de modalités d'engagement dans l'interdisciplinarité. La fragilisation des frontières disciplinaires trouve plusieurs explications : la forte spécialisation des sciences contemporaines provoque une fragmentation des disciplines, qui encourage à son

⁶ Citons ici la biologie moléculaire (Mullins, 1972) ; la biochimie et la biologie moléculaire (Gaudillière, 2002) ; la psychologie (Ben-David et Collins, 1966) ; la bio-informatique (November, 2012) ; la science des matériaux (Bensaude-Vincent, 2001) ; l'immunologie (Löwy, 1990) ; la chimie du solide (Teissier, 2010), etc.

tour l'hybridation de fragments de sciences (Dogan et Pahre, 1991) ; l'avènement des approches réductionnistes dans plusieurs domaines scientifiques, autrement dit l'étude de systèmes complexes par celle des éléments simples qui les composent, a rendu l'interdisciplinarité indispensable à l'intégration des niveaux d'analyse (Lenoir, 1997 ; Bonaccorsi, 2010).

Attentifs aux échanges interdisciplinaires, ces auteurs ne réfutent pas pour autant en bloc l'importance des frontières de la spécialité ou de la discipline dans les pratiques scientifiques. Certains mobilisent en particulier la notion d'objet frontière (Star et Griesemer, 1989) pour souligner que les éléments qui circulent dans les réseaux interdisciplinaires permettent la coopération entre des mondes sociaux demeurant clairement délimités par un point de vue, une identité ou des enjeux (Trompette et Vinck, 2009). Dans la même veine, des auteurs qualifient la coopération entre disciplines ou communautés scientifiques de zone d'échanges (Galison, 1997), d'arène interstitielle (Joerges et Shinn, 2001), ou de zone franche (Marcovich et Shinn, 2011) qui n'appartiennent à aucun collectif en présence et ne menacent pas les identités scientifiques. Enfin, certains travaux mettent un accent particulier sur la place des référents disciplinaires dans les projets interdisciplinaires pour critiquer le mot d'ordre d'un « mode 2 » de la production scientifique (Gibbons *et al.*, 1994). Face à une perspective « anti-différenciationniste » qui annonce la dissolution des frontières des disciplines (et plus largement, de la science académique), ils proposent une approche « différenciationniste » des sciences (Shinn et Ragouet, 2005 ; Brunet et Dubois, 2012), qui souligne l'autonomie relative des communautés scientifiques vis-à-vis des champs économiques et politiques, ainsi que la coexistence de logiques de différenciation – notamment disciplinaires – et de mouvements de convergence – impulsés en particulier par la circulation des instruments (Shinn et Ragouet, 2005, p. 145). Dans cette perspective, Anne Marcovich et Terry Shinn (2011) proposent le concept de « nouvelle disciplinarité » pour décrire la place du régime disciplinaire (Shinn, 2000) dans la recherche interdisciplinaire en nanosciences⁷. La discipline apporte aux chercheurs un vocabulaire spécifique, des questions pertinentes et des ressources de communication. Les mouvements centrifuges et centripètes que les scientifiques opèrent vis-à-vis d'elle n'effacent pas ses frontières : « Le déplacement renvoie au mouvement sélectif et intermittent d'un scientifique aux marges de sa discipline [...] La discipline constitue le référent et agit constamment comme une force gravitationnelle sur le praticien. » (Marcovich et Shinn, 2011, p. 596).

Au total, ces études concluent que la recherche interdisciplinaire accroît l'absence de superposition entre les disciplines et les collectifs qui concourent effectivement aux projets scientifiques, mais qu'elle n'abolit pas les références et espaces disciplinaires. Insistant sur les dimensions cognitives des disciplines, ces travaux ne questionnent pas la manière dont l'interdisciplinarité transforme les institutions disciplinaires : soit qu'ils excluent implicitement cet objet de leur champ d'étude ; soit qu'ils considèrent que ces institutions, relativement inertes, renseignent peu sur la dynamique des pratiques interdisciplinaires.

⁷ Les nanosciences donnent lieu à une série de travaux visant à trouver des indicateurs de la place des disciplines, dans les pratiques comme dans les publications scientifiques (Schummer, 2004 ; Rafols et Meyer, 2007).

Pour une analyse des conséquences de l'interdisciplinarité sur les institutions disciplinaires

Dans cet article, nous souhaitons analyser les liens entre la recherche interdisciplinaire et la recomposition des territoires des disciplines, abordées dans leurs dimensions sociales, professionnelles et institutionnelles. Considérant ici les disciplines comme un instrument de l'action collective pour les scientifiques (Vinck, 2000, p. 72), nous étudions dans quelle mesure l'interdisciplinarité peut servir des « programmes disciplinaires » et ainsi contribuer à la protection de frontières ou à l'extension de territoires disciplinaires. Avec cette notion, nous reprenons la manière dont Timothy Lenoir et, à sa suite, d'autres auteurs (Dubois, 2014) désignent les actions qui constituent les disciplines en tant « qu'institutions politiques qui délimitent des aires du territoire académique, allouent des privilèges et des responsabilités d'expertise, et structurent des revendications sur les ressources » (Lenoir, 1997, p. 58). La réussite des programmes disciplinaires ne découle pas des succès scientifiques, mais de la capacité à générer des niches institutionnelles qui abritent les approches scientifiques et apportent des ressources pour « organiser l'emploi, établir des rôles de service, créer des systèmes de rétribution, et routiniser la socialisation professionnelle » (*ibid.*, p. 58). Michel Dubois (2014) dégage cinq actions qui renforcent les programmes disciplinaires de George Sarton et Robert K. Merton : investir le marché du travail académique ; se démarquer des disciplines préexistantes ou environnantes ; créer et diriger des instruments disciplinaires (revues, associations, laboratoires) ; former et faire recruter des disciples auxquels est transmis un ethos scientifique ; produire le récit de l'identité disciplinaire. La notion de programme disciplinaire s'inscrit dans une vision agonistique et concurrentielle de la science, pour laquelle la discipline permet l'appropriation de ressources rares et l'institutionnalisation durable de programmes de recherche⁸. Toutefois, elle ne fait pas de la discipline une entité purement sociale, voire une simple rhétorique au service d'enjeux de pouvoir, mais l'envisage comme un assemblage scientifique, technique, social et organisationnel (Lenoir, 1997, p. 61), que le programme disciplinaire permet de consolider.

Présentée comme domaine éminemment collaboratif, faisant advenir à ce titre une « nouvelle biologie » (National Research Council, 2009), la nanomédecine offre un terrain d'observation particulièrement intéressant de l'interdisciplinarité. Nous la caractérisons dans la section suivante du point de vue des pratiques et ambitions interdisciplinaires et de sa composition disciplinaire. Nous montrons que les scientifiques ne souhaitent pas en faire une discipline mais qu'ils intègrent plutôt les nanosciences et nanotechnologies à leur spécialité. Face à l'absence d'enjeu disciplinaire pour la nanomédecine, nous interrogeons les logiques sociales qui maintiennent, voire renforcent, la prépondérance numérique de spécialités de sciences chimiques, physiques et des sciences de l'ingénieur. Dans la dernière section, nous montrons de quelle manière l'interdisciplinarité peut servir leur programme disciplinaire. Tout d'abord, l'interdisciplinarité se prête particulièrement bien au travail de démarcation (Gieryn, 1983) que les spécialités opèrent vis-à-vis des sciences du vivant, grâce auquel elles paraissent

⁸ T. Lenoir (1997) l'ancre explicitement dans le programme bourdieusien d'analyse des champs scientifiques (Bourdieu, 1984).

indispensables au développement du domaine et occupent une position favorable dans les programmes de formation comme sur les marchés du travail académique. Ensuite, ces spécialités disposent d'une certaine plasticité qui favorise l'intégration du vivant à leurs objets d'investigation. Cette extension de leur juridiction facilite la valorisation de la nanomédecine au sein de leurs instruments disciplinaires (en particulier les revues) et leur permet de multiplier leurs sources de financement.

Encadré 1. – *Une enquête sur la nanomédecine en France et en Californie*

Cet article repose sur une enquête en France et en Californie, conduite en 2011-2012. Le matériau empirique se compose de 62 entretiens en face-à-face, enregistrés et retranscrits intégralement, avec des chercheurs en nanomédecine (37 en France ; 25 dans quatre universités de Californie : Berkeley, Davis, San Francisco, Santa Barbara¹) ; d'analyses documentaires (rapports de prospective, déclarations politiques, etc.) et bibliométriques (publications référencées dans le Web of Science²) ; d'analyses de bases de données de projets.

La France et les États-Unis, terres de contraste en matière de recherche interdisciplinaire

Cette enquête s'inscrit dans un projet consacré aux dynamiques de structuration d'un domaine interdisciplinaire de recherches, la nanomédecine³. Au croisement de la sociologie des sciences et de la sociologie de l'action publique en matière de science et d'innovation, il interroge le poids respectif des logiques scientifiques et des pressions institutionnelles à l'interdisciplinarité et analyse les reconfigurations des organisations et des institutions scientifiques autour de la recherche interdisciplinaire. Ce questionnement a motivé le choix de deux pays très contrastés *a priori* quant aux conditions institutionnelles de développement de l'interdisciplinarité : la France, dont les structures académiques sont généralement considérées comme peu propices à l'interdisciplinarité (gestion disciplinaire des carrières par des instances nationales, cloisonnements institutionnels à l'échelle des départements, des universités ou des écoles) ; les États-Unis, fréquemment pris comme exemple d'un système universitaire favorisant la recherche interdisciplinaire.

Le contraste entre la France et les États-Unis en matière de soutien à la recherche interdisciplinaire paraît particulièrement fort pour les sciences du vivant. Ainsi, la référence au « modèle américain » est-elle récurrente dans les rapports français consacrés au sujet (MINEFI, 2011 ; OPECST, 2004). Ce modèle est associé, d'une part, au système universitaire américain (décentralisation qui facilite l'action d'entrepreneurs institutionnels souhaitant casser les frontières disciplinaires⁴ ; forte compétition pour la réputation qui incite à la prise de risque et stimule le pluralisme intellectuel [Whitley, 2003]) ; d'autre part, aux politiques scientifiques (capacité à mobiliser rapidement des budgets pour les domaines interdisciplinaires émergents [Bonaccorsi, 2007]). Ainsi, depuis les années 1980, de grandes initiatives soutiennent la structuration de domaines d'interface entre sciences de la vie, sciences physiques et sciences de l'ingénieur : l'ingénierie génétique dans les années 1980, la bio-ingénierie et la bio-informatique dans les années 1990 (Agnew, 1998). Dans les années 2000, la nanomédecine est soutenue par deux appels à projet des National Institutes of Health (NIH)⁵ : pour des Nanomedicine Development Centers (NDC) (8 centres créés à partir de 2004) ; pour une « Alliance for Nanotechnology in Cancer » (8 centres d'excellence, 12 plateformes partenariales et 11 équipes interdisciplinaires d'enseignement et de recherche, créés entre 2005 et 2010 par le National Cancer Institute du NIH). Le retard pris par la France (et, plus généralement, par l'Europe) en la matière est attribué aux cloisonnements institutionnels et disciplinaires ainsi qu'à un moindre volontarisme politique : financements publics moins abondants et en ordre dispersé, prise de conscience tardive des enjeux technologiques, économiques et cliniques de l'ingénierie du vivant (OPECST, 2004), absence de financement dédié à la nanomédecine (European Science Foundation, 2004). Les agences nationales et la Commission européenne cherchent à combler ce retard en créant des appels d'offre dédiés⁶.

Le choix de la population d'enquête

Aux États-Unis, nous avons conduit nos entretiens dans une aire géographique (la *Bio Bay* californienne) souvent prise comme modèle de développement des biotechnologies et, à ce titre, susceptible de concentrer des recherches en nanomédecine. En France, nous n'avons pas circonscrit *a priori* notre enquête à une région.

Par ailleurs, nous avons identifié notre population d'enquête parmi les responsables scientifiques de projets financés sur fonds publics (par les NIH, par les appels d'offre thématiques de l'Agence nationale pour la recherche [ANR] et par les programmes-cadres européens). Nous avons veillé à couvrir les trois principaux domaines d'orientation de la nanomédecine (le médicament, le dispositif médical, la médecine régénérative – cette dernière étant moins présente dans la nanomédecine en général, et dans notre population en particulier⁷) et à diversifier les applications thérapeutiques (cancer, maladies cardiovasculaires et neurodégénératives).

1. Les entretiens ont été réalisés lors d'un séjour à l'université de Berkeley en tant que *Visiting Scholar* (printemps 2012, Center for the Study of Science, Medicine and Society).
2. Proposé par la société ISI-Thomson Reuters, le Web of Science est la plus grande base de données bibliographiques (plus de 10 000 revues).
3. Ce projet est financé par l'ANR (*Hybridtrajectories*, ANR 2010 Blanc – 1811-01).
4. Ce dynamisme entrepreneurial est notamment à l'origine de la création de départements de biologie moléculaire dans les années 1980 (Jong, 2008).
5. Tous deux s'inscrivent dans la National Nanotechnology Initiative (NNI), politique fédérale de soutien aux nanotechnologies lancée en 2000 qui dispose d'un budget cumulé de 21 milliards de dollars en 2014 (*source* : <http://www.nano.gov/about-nni/what/funding>).
6. En France, l'ANR crée notamment les appels d'offre thématiques *P2N* (*Programme pour les nanotechnologies et les nanosystèmes*), *Techsanté*, et *Nanobio*. À l'échelle européenne, la nanomédecine est tout d'abord financée (dans le 6^e programme-cadre et les quatre premiers appels d'offre du 7^e) par l'intermédiaire des programmes *Santé* et *NMP* (nanosciences, nanotechnologies, matériaux et nouvelles technologies de production). Elle bénéficie ensuite d'appels d'offre dédiés.
7. La plupart des états des lieux de la nanomédecine soulignent la surreprésentation des deux premiers domaines, par exemple le rapport du cabinet de consultants Bionest Partners (2008).

La nanomédecine, un domaine d'ingénierie du vivant

Pratiques et ambitions du travail interdisciplinaire

La nanomédecine appartient à l'ingénierie du vivant ou à la bio-ingénierie, qui « intègre les sciences physiques, chimiques, mathématiques, ainsi que les principes d'ingénierie pour étudier la biologie, la médecine, les comportements et la santé »⁹. Des échanges nourris entre des spécialités de biologie (biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, bio-informatique) et les spécialités qui fabriquent, observent ou caractérisent des objets de taille nanométrique (selon les projets, chimie, physique appliquée, mécanique, électronique, bio-informatique, science de matériaux, traitement du signal) visent à enrichir les connaissances et les capacités d'action sur le vivant. La nanomédecine est en très forte expansion, comme en

⁹ Définition du NIH (2003) souvent reprise, notamment dans des rapports de prospective du CNRS. Outre la nanomédecine, la bio-ingénierie comporte la biologie synthétique, la recherche sur les cellules souches et l'ingénierie tissulaire.

témoigne la croissance exponentielle de ses publications (185 074 articles référencés en juin 2014 dans le Web of Science¹⁰, contre environ 20 000 en 2004).

La notion d'interdisciplinarité recouvre une telle diversité de pratiques scientifiques (Dogan et Pahre, 1991) qu'il est nécessaire de qualifier les pratiques interdisciplinaires en nanomédecine pour analyser la place qu'y occupent les disciplines. Au-delà de la variété des objets, des méthodes et des applications, l'interdisciplinarité s'opère en nanomédecine selon deux modes (Vinck, 2000) : la complémentarité (entre les compétences disciplinaires, au service d'un objectif commun d'analyse ou de conception) ; l'importation (emprunt de concepts, de méthodes ou de modèles). Ceux-ci sont repérables dans tous les projets, même s'ils n'y occupent pas la même place. Tout d'abord, les pratiques interdisciplinaires reposent sur une complémentarité entre outils d'observation et de mesure des sciences chimiques, physiques et des sciences de l'ingénieur, et des sciences du vivant. Elles sont centrales dans les projets de nanomédecine visant à connaître le vivant et à en diagnostiquer les dysfonctionnements. Le recours aux outils de la biophysique, de la chimie et de la bio-informatique donne accès à une meilleure connaissance des mécanismes moléculaires (par exemple dans le projet *Repliement des protéines*, à l'identification de molécules et de cellules individuelles dans des environnements biologiques complexes, voir ETP Nanomédecine, 2005, p. 16) et améliore les outils de diagnostic (projet *Imagerie optique*). Par exemple, des techniques de diagnostic *in vitro* utilisant des nanoparticules magnétiques sont dix millions de fois plus sensibles que les techniques conventionnelles de la biologie moléculaire (Mirkin, Nel et Thaxton, 2011, p. 232).

ENCADRE 2. – *L'interdisciplinarité comme complémentarité entre outils d'observation et de mesure*

Projet Imagerie optique

Ce projet utilise des nanoparticules fluorescentes comme agent de contraste pour l'imagerie optique. Le responsable d'équipe est un **physico-chimiste**. Financé par l'ANR, le projet débute avec une thèse en **chimie des polymères** sur la synthèse d'une nanoparticule. Au cours de la thèse, l'encadrant développe des collaborations avec des **chimistes** et des **physico-chimistes** qui apportent des outils de caractérisation de la nanoparticule, ainsi qu'avec un **biologiste** et un **immunologiste** qui étudient son immuno-toxicité sur des modèles animaux. Ce travail a été publié dans le *Journal of Biomedical Nanotechnology*.

Projet Repliement des protéines

Financé comme Nanomedicine Development Center par le NIH, ce projet associe une douzaine d'équipes qui étudient et conçoivent les protéines facilitant les repliements protéiques (de mauvais repliements protéiques étant à l'origine de plusieurs maladies). Le projet s'engage autour d'études complémentaires de caractérisation de ces protéines « chaperons » : fonctionnelle (collaboration de **chimistes** et de **biochimistes**), structurale et mécanique (collaboration de **biophysiciens** et de **biologistes structuraux**). Des **bio-informaticiens** mobilisent ensuite ces

¹⁰ Interrogation du Web of Science le 17/06/2014, selon la méthode exposée dans l'Encadré 1. Cette augmentation s'explique par la croissance du domaine, mais aussi par des stratégies de labellisation et par un opportunisme éditorial : dans les années 1990, plus de 160 revues de nanotechnologies ont été créées (Grieneisen, 2010).

connaissances dans un travail de simulation de la dynamique et des interactions des protéines. Enfin, cette simulation permet de synthétiser des protéines chaperons (par la **bio-informatique** et le **génie mécanique**) qui sont à leur tour caractérisées avec les outils de la biophysique, de la chimie et de la biochimie. Ce travail a été publié dans la revue *Nature Nano*.

Ensuite, l'interdisciplinarité se traduit par l'importation de méthodes et de modèles. Ces pratiques interdisciplinaires sont particulièrement importantes dans les projets de fabrication d'un objet (d'une membrane nano-structurée dans le projet de *Régénération tissulaire* ; de nano-transporteurs ou nano-vecteurs délivrant des médicaments sur leur cible dans le projet *Nanomédicaments*) doté de certaines propriétés et fonctionnalités biologiques. Les chimistes et les chercheurs en sciences des matériaux apportent notamment des savoir-faire développés dans d'autres domaines (énergie, agroalimentaire, micro-électronique, etc.) et améliorent des techniques de synthèse de la biologie moléculaire et cellulaire, par exemple pour des thérapies cellulaires (projet *Régénération tissulaire* ; Mirkin, Nel et Thaxton, 2011, p. 252). Par ailleurs, les sciences de l'ingénieur (comme le génie mécanique) importent des méthodes et principes généraux d'ingénierie ou de rétro-ingénierie¹¹ qui président par exemple à la synthèse des protéines « chaperons » dans le projet *Repliement des protéines*. Cet apport est également au cœur de certains projets d'ingénierie tissulaire : « Nous développons de nouvelles stratégies pour assembler des nano-fibres et des minéraux dans une structure. C'est une approche *bottom up* qui imite la structure naturelle de l'os. » (Californie, Entretien 6, chimiste).

ENCADRE 3. – *L'interdisciplinarité comme importation de méthodes et de modèles*

Projet Régénération tissulaire

Financé par l'ANR, ce projet utilise les nanotechnologies pour fabriquer des implants dits « bio-actifs » ou « intelligents » (ils libèrent le principe actif seulement au contact de la cellule) et améliorer ainsi la régénération de tissus obtenue grâce aux cellules souches. Le responsable du projet est **biochimiste**. Il collabore avec des **chimistes des polymères** qui fabriquent la membrane nano-structurée servant de support de croissance aux cellules souches. Il travaille également avec des **biologistes cellulaires** qui génèrent des cellules souches (cellules iPS) et réalisent des tests *in vitro* et *in vivo*. Ce travail a notamment été publié dans la revue *American Chemical Society Nano (ACS Nano)*.

Projet Nanomédicaments

Financé par une bourse non fléchée (R01) du NIH, ce projet utilise les propriétés de ciblage des nanoparticules pour mieux administrer les médicaments. Le responsable du projet est un chercheur en **sciences pharmaceutiques**. Il collabore avec un professeur de **génie chimique** qui conçoit et fabrique des nanoparticules (pour le domaine médical et pour des applications énergétiques). L'équipe dispose de compétences en **sciences pharmaceutiques** pour travailler sur la formulation du médicament (excipients, etc.) et en **biologie** pour étudier son efficacité et sa

¹¹ La rétro-ingénierie (*reverse engineering*) désigne la conception d'objets inspirée des structures biologiques présentes dans la nature. Elle est très présente en ingénierie tissulaire.

biocompatibilité chez les animaux. Ce travail a été publié dans l'*European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*.

Au total, ces pratiques interdisciplinaires servent des ambitions épistémiques de nature doublement instrumentale. À un premier niveau, elles apportent des modes de connaissance et d'action qui nourrissent les innovations biomédicales. D'une certaine manière, la connaissance du vivant ne constitue pas tant un objectif en soi qu'un moyen de faire advenir une médecine « prédictive, préventive, personnalisée et participative » (dite médecine des « 4P »), fondée sur des informations moléculaires plutôt que sur des connaissances empiriques et symptomatiques. À un second niveau, cette interdisciplinarité prolonge le projet philosophique du xx^e siècle de contrôler et de manipuler le vivant grâce à plusieurs disciplines (Calvert et Fujimura, 2011). Cette vision instrumentale est particulièrement forte chez les chercheurs qui incluent la nanomédecine dans la biologie de synthèse et défendent l'idée selon laquelle la transformation du monde peut précéder sa connaissance¹².

L'absence d'enjeu disciplinaire

Les chercheurs en nanomédecine partagent des pratiques d'interdisciplinarité et les mettent au service d'une même vision instrumentale de leurs recherches. Ces attentes communes les conduisent à plaider pour le financement de programmes interdisciplinaires mais elles ne donnent actuellement pas lieu à la formulation d'un « enjeu disciplinaire » (Cambrosio et Keating, 1983) ou à la défense d'un « programme disciplinaire » pour la nanomédecine (Lenoir, 1997)¹³. Ainsi les chercheurs s'identifient-ils à leur spécialité et considèrent les nanotechnologies comme des outils qui l'enrichissent. Par ailleurs, le petit nombre d'instruments disciplinaires (tels que les revues¹⁴, les laboratoires, les départements ou les formations) témoigne du caractère marginal des stratégies de fermeture professionnelle et d'occupation de niches institutionnelles. À l'inverse, la nanomédecine apparaît comme un label à défendre pour étendre le domaine : « Parler de nanomédecine permet de faire reconnaître à nos financeurs que de nouvelles perspectives, qui viennent des physiciens et des ingénieurs, peuvent être utiles pour traiter de problèmes médicaux. L'impact réel du terme est aussi d'attirer

¹² C'est le cas des chercheurs du projet *Repliement des protéines*. Par ailleurs, dans la présentation de son équipe, un chercheur en biologie cellulaire (Californie, Entretien 11) reprend une citation de Richard Feynman, prix Nobel de physique en 1965 : « *What I cannot create, I cannot understand.* »

¹³ Nous n'excluons toutefois pas que des processus de disciplinarisation (qui dépendent moins de la cohérence scientifique du domaine que d'actions des scientifiques et de leurs sponsors) s'engagent à l'avenir, comme cela a été par exemple le cas avec l'ingénierie biomédicale aux États-Unis (érigée comme discipline dans les années 1990 et 2000, à la suite du financement par la Fondation Whitaker de 80 départements universitaires).

¹⁴ Par exemple, les États-Unis (premier pays au monde en termes de concentration de recherches en nanomédecine) comptent un seul « Département » et la France trois « laboratoires » de nanomédecine. Par ailleurs, les deux revues de nanomédecine (*International Journal of Nanomedicine*, classée en Nanoscience-Nanotechnology et Pharmacy-Pharmacology ; et *Nanomedicine*, classée en Biotechnology-Applied Microbiology et en Nanoscience-Nanotechnology) ne figurent pas parmi les premières publications en nanomédecine.

des personnes qui ne travaillent pas sur des problèmes cliniques, d'introduire leur point de vue. » (Californie, Entretien 8, bio-ingénieur).

Un domaine « peuplé par les ingénieurs et les physiciens »

L'exercice de l'interdisciplinarité s'accompagne d'une certaine division du travail entre « les nouveaux entrants » de la recherche biomédicale qui travaillent plutôt sur des objets organiques et/ou fabriqués par l'homme et ses acteurs traditionnels. D'un côté, les sciences chimiques, physiques et les sciences de l'ingénieur importent en nanomédecine des instruments, des modèles, des principes, et interviennent à ce titre aux étapes de conception, de fabrication et de test des projets. De l'autre, les biologistes se positionnent plutôt dans le rôle, certes indispensable mais plus circonscrit, de fournisseurs de données. En amont de la synthèse « rationnelle » des objets biologiques, ils apportent une connaissance des propriétés et modes d'action de la molécule naturelle que l'objet synthétisé doit reproduire (Dalgalarondo *et al.*, 2004). En aval, ils analysent ses effets *in vitro* et *in vivo* et facilitent ainsi les applications thérapeutiques.

On comprend aisément que cette division du travail s'accompagne d'un déséquilibre numérique en faveur des sciences chimiques, physiques et des sciences de l'ingénieur, décrites dans les entretiens comme le « barycentre » des équipes de nanomédecine¹⁵. À un niveau plus agrégé, leur prépondérance se retrouve dans le classement disciplinaire des articles répertoriés dans le Web of Science. Les États-Unis et la France ont un profil assez proche en la matière¹⁶ puisque la biochimie et la biologie moléculaire n'y arrivent qu'en cinquième position avec respectivement 9,6 % et 14 % des articles de nanomédecine, après la chimie, les sciences des matériaux, les nanosciences et nanotechnologies et la physicochimie. Cela étant, ce serait entretenir une vision purement fonctionnaliste de la division du travail que de supposer que les besoins de la recherche en nanomédecine conditionnent directement cette répartition disciplinaire. À l'inverse, nous interrogeons, dans la section suivante, les logiques sociales (reconnaissance des compétences, attribution des tâches, apprentissages, circulation des acteurs, etc.) qui renforcent la présence de certaines spécialités.

L'interdisciplinarité au service de programmes disciplinaires

Des pratiques interdisciplinaires particulièrement propices au travail de démarcation

¹⁵ Un domaine « peuplé par les ingénieurs et les physiciens », selon les termes d'un biologiste (Californie, Entretien 15, biologiste moléculaire).

¹⁶ Voir en Annexe (Tableau A1). Nous sélectionnons les articles qui mentionnent un financement par une agence publique française ou américaine. Cette méthode sous-estime le nombre de publications mais elle cible celles dans lesquelles des auteurs français ou américains ont eu une contribution significative (contrairement à celle consistant à retenir tous les articles dont les auteurs mentionnent une adresse en France ou aux États-Unis).

La recherche en nanomédecine paraît doublement propice à l'entreprise de démarcation (Gieryn, 1983) des sciences chimiques, physiques ou des sciences de l'ingénieur, définie comme la construction de frontières vis-à-vis d'approches alternatives, sur lesquelles elles peuvent appuyer des revendications d'autorité et demander certaines ressources.

Tout d'abord, le recours à l'instrumentation des sciences physiques et de l'ingénieur, ainsi qu'à la simulation informatique, alimente un discours de scientification de l'observation du vivant. Scientification du recueil des mesures tout d'abord : « Sans mesures réelles, la biologie est une religion. Par exemple je préparais un cours, et tous les manuels de biologie nous disent que les lipo-protéines de la bactérie *E. Coli* sont ancrées à la surface péri-plasmique de la membrane interne. Mais où est la preuve ? Il n'y en a pas. C'est de l'imagination ou de la religion mais pas de la science. » (Californie, Entretien 16, biophysicien). La complexité de l'instrumentation en nanotechnologies ainsi que son usage *ad hoc* font obstacle à son appropriation par les biologistes et entretiennent leur dépendance envers la culture instrumentale de la physique appliquée (Jouvenet, 2007) : « Dans les années 1990-1995, les biologistes achetaient les techniques et les importaient directement. Les bionanosciences, c'est un nouveau monde où on est capable de prendre une molécule, de la manipuler, etc. Les biologistes n'ont pas la culture du développement de l'instrumentation. Et ils ne peuvent pas l'utiliser comme boîte noire. » (France, Entretien 15, physicien). Scientification du traitement des données ensuite, par la modélisation et la simulation informatiques. Celles-ci occupent une place importante en nanomédecine, pour « donner un sens aux données » et concevoir des molécules¹⁷. Se rejoue ici, sur la scène de la nanomédecine, l'affirmation de la supériorité de la *dry biology* (l'informatique) sur la *wet biology* (les paillasses) (Penders, Horstman et Vos, 2008), qui date des débuts de l'informatique biomédicale durant l'entre-deux-guerres (November, 2012) et s'exacerbe aujourd'hui avec le traitement de la masse de données biologiques (Fujimura, 2005 ; Calvert et Fujimura, 2011) : « Nous finissons aujourd'hui de décrire ce qui se passe dans le corps. La question qui se pose est, d'accord, comment marchent les maladies ? Pour y répondre, la biologie doit passer d'une phase descriptive à une phase quantitative. Ça ne se fera qu'en important les principes de la physique, de la chimie, des mathématiques, de l'ingénierie, de l'informatique. » (Californie, Entretien 15, biologiste moléculaire). Ironiquement, les chercheurs en nanomédecine relèguent la biologie moléculaire dans le camp des « naturalistes » et des collectionneurs (contre lequel elle a précisément été créée) (Strasser, 2007), considérant les séquences moléculaires comme une forme contemporaine de collection du vivant (Strasser, 2012)¹⁸.

Ensuite, les bons résultats obtenus en matière de conception de molécules ou d'objets autorisent parfois la tenue d'un discours sur la « rationalité » des approches développées grâce notamment à la chimie, au génie mécanique ou à la science des matériaux, à l'opposé du « bricolage », caractéristique de la biologie moléculaire et du génie génétique. Ce discours est particulièrement présent chez les chercheurs qui rallient la nanomédecine au programme de la biologie de synthèse (Calvert, 2013) : « Ce qui différencie la biologie de synthèse de la biologie moléculaire et de ses proches alliés comme le génie génétique et métabolique, c'est l'ambition

¹⁷ Ces deux fonctions sont par exemple au centre du projet *Repliement des protéines* exposé dans l'Encadré 2.

¹⁸ Constituée en laboratoire plutôt que dans le jardin botanique ou le musée zoologique.

de formaliser le processus de conception des systèmes cellulaires, à la manière dont les disciplines traditionnelles du génie ont formalisé la conception et la fabrication [...]. Pour ce faire, les biologistes de synthèse cherchent à aller au-delà des voies d'ingénierie qualitatives et souvent *ad hoc* qui expliquent la lenteur des progrès jusqu'ici. » (Arkin et Fletcher, 2006, p. 114).

Les chercheurs des sciences chimiques, physiques ou de l'ingénieur sont décrits comme les détenteurs principaux des compétences de mesure, de simulation, de synthèse, d'ingénierie, requises en nanomédecine. Ils paraissent de ce fait capables de relever les défis de la scientification et de la rationalisation de la recherche biomédicale : « La biologie a été peuplée avec des personnes qui adorent la description, il faut maintenant former des personnes qui adorent le quantitatif. Donc, en nanomédecine, des ingénieurs, physiciens et chimistes. » (Californie, Entretien 15, biologiste moléculaire). « C'est beaucoup plus facile de venir de la physique, parce que vous pouvez regarder cinq maladies différentes sans rien savoir sur elles, et vous intéresser aux principes généraux pour créer des systèmes synthétiques qui imitent les comportements biologiques. » (Californie, Entretien 3, chimiste). Dès lors, les formations interdisciplinaires de master ou de doctorat ciblent en premier lieu les non-biologistes, et ce, même lorsqu'elles sont proposées par des départements de sciences du vivant : « Ce master s'adresse non seulement aux étudiants des écoles d'ingénieurs [...] mais également aux universitaires (biologistes, chimistes, biochimistes, physiciens, pharmaciens, médecins, etc.) ayant une solide formation initiale en physique et/ou en chimie. » (présentation d'un master français de bio-ingénierie). Face à une interdisciplinarité vue comme un changement urgent et radical, les acteurs de la nanomédecine (et, plus généralement, de l'ingénierie pour le vivant) expriment un certain pessimisme quant à l'intégration de la boîte à outils des sciences physiques ou de l'ingénieur dans les études de biologie. Des rapports français et américains soulignent le caractère disciplinaire de l'enseignement de la biologie au niveau prédoctoral (National Research Council, 2003, 2009 ; MINEFI, 2011) et énumèrent les obstacles à l'interdisciplinarité. Ceux-ci sont d'ordre pratique (difficulté à sélectionner quels savoirs incorporer aux corpus d'enseignement en biologie [Tibell et Rundgren, 2010]) ; épistémologique (refus de certains biologistes d'utiliser des formalismes mathématiques pour comprendre les systèmes biologiques complexes [Guespin-Michel et Ripoll, 2000]) ; enfin pédagogique (adaptation pragmatique du contenu des enseignements à des publics étudiants considérés comme réfractaires à la formalisation mathématique) : « Les jeunes partent en biologie, en génétique, parce qu'il y a moins d'abstraction. Et à un moment, les biologistes poussaient pour limiter le poids de la physique en première année en France, mais aussi au Danemark ou en Angleterre. Après, ils se sont rendu compte que [si les étudiants] ne connaissent pas l'entropie, la deuxième loi de la thermodynamique [en] physique fondamentale, ils sont perdus. » (France, Entretien 36, physicien).

L'affirmation du caractère unique, pour la nanomédecine, des compétences des chercheurs formés aux sciences chimiques, physiques ou aux sciences de l'ingénieur conduit par ailleurs les départements à les privilégier lors des recrutements. En France comme aux

États-Unis, ces chercheurs sont très convoités par leur département d'origine mais aussi par ceux des sciences du vivant, tandis que les biologistes ne bénéficient pas d'un élargissement comparable de leur marché du travail académique : « Nous avons recruté, dans le département de biologie moléculaire et cellulaire, des professeurs qui vous diront fièrement qu'ils n'ont pas suivi un cours de biologie depuis le lycée. » (Californie, Entretien 25, biologiste du développement) « Notre département de bio-ingénierie n'embauchera jamais quelqu'un avec un pur diplôme de biologie. Nous avons besoin d'une formation technique, en ingénierie et en maths. Nous n'avons aucun professeur qui vient de biologie, mais j'ai des doctorants en biologie. Et ils chercheront du travail dans des départements de biologie. » (Californie, Entretien 21, bio-ingénieur).

Plasticité des sciences chimiques, physiques et des sciences de l'ingénieur et extension des frontières disciplinaires

En important des méthodes et des modèles des sciences chimiques, physiques et des sciences de l'ingénieur, la nanomédecine alimente une longue histoire au cours de laquelle les objets biologiques ont été pensés comme des machines inorganiques (Fujimura, 2005). De ce fait, le vivant offre un terrain d'exploration sur lequel des ressources cognitives et institutionnelles peuvent être exploitées et renforcées, au-delà des protestations formelles contre l'impureté de l'objet : « J'ai assisté à un colloque intitulé *Biological Physics: Frontier or Wilderness*. Certains physiciens très réputés, dont des prix Nobel, avançaient qu'on salit la physique en regardant des systèmes biologiques. » (Californie, Entretien 3, chimiste). La plasticité de ces disciplines facilite tout particulièrement l'extension de leur juridiction au moyen d'une rhétorique de la « réduction » (Abbott, 1988) où le vivant est considéré comme une classe d'objets parmi d'autres. Cette plasticité comporte deux dimensions. Tout d'abord, aucune de ces disciplines ne s'attache à un type d'objet spécifique. Qualifiée de « science sans territoire », la chimie a, au cours de son histoire, été vulnérable aux tentatives d'annexion mais s'affirme aujourd'hui comme « architecte de la matière » (Bensaude-Vincent et Stengers, 2001, p. 330) organique, inorganique ou hybride. De même, la science des matériaux est une discipline récente issue de l'agrégation de plusieurs spécialités autour d'un concept (le « matériau ») qui ne se définit pas par sa composition mais par des propriétés qui lui confèrent une utilité (Bensaude-Vincent, 2001). Enfin, les sciences de l'ingénieur s'intéressent à tous les objets fabriqués par l'homme (Ramunni, 1995), y compris les molécules qui remplissent des fonctions biologiques. Modéliser et reproduire les « machines molles du vivant » (Jones, 2004) pose des problèmes épistémologiques redoutables¹⁹, auxquels les scientifiques de ces disciplines cherchent des solutions en s'inspirant d'objets biologiques ou inorganiques : « Nous avons toujours fait des nanostructures fonctionnalisées, il y a plusieurs années pour l'industrie microélectronique, maintenant pour le milieu biomédical. Les concepts sont les mêmes mais les applications sont différentes. » (Californie, Entretien 7, chercheur en science des matériaux). « J'ai travaillé pour l'agroalimentaire avec des concepts tout à fait similaires [...]. Pour délivrer

¹⁹ Il est impossible de transposer les principes d'ingénierie qui fonctionnent aux échelles supérieures, car les lois physiques diffèrent à l'échelle nanométrique.

une molécule, de façon précise, aux abords d'une graine. » (France, Entretien 1, chercheur en sciences pharmaceutiques). Habituellement risquées (Gieryn, 1978), ici, à l'inverse, les bifurcations enrichissent les trajectoires scientifiques. En effet, une formation ou une expérience professionnelle en dehors de la biologie apporte une grammaire d'analyse du vivant : « J'ai travaillé pour les laboratoires Bell sur des communications à haut débit, sans fil et optique. J'ai complètement changé de trajectoire quand j'ai été recruté ici comme assistant professeur. Là, j'ai commencé à travailler sur la médecine personnalisée. Les gens me disaient que j'étais cinglé de faire cela sans être titulaire mais je m'en suis bien sorti [rires]. On a commencé à travailler sur la bioséparation, séparer des bactéries dans des échantillons complexes. Et ça demande beaucoup d'ingénierie, de l'électromagnétisme, de la microfluidique, des choses que je connais bien. » (Californie, Entretien 24, chercheur en science des matériaux)²⁰.

Par ailleurs, ces disciplines se situent d'emblée dans le « Quadrant de Pasteur » (Stokes, 1997), qui associe la recherche de principes généraux à la résolution de problèmes concrets (Grossetti, 2000). Elles peuvent dès lors être simultanément qualifiées de « fondamentales » sur le plan épistémologique (les résultats en sont relativement imprédictibles, et non liés à la résolution d'un problème spécifique) et d'« appliquées » dans le registre de l'intentionnalité (elles apportent des connaissances utiles à la conception d'objets) (Calvert, 2006). Ce double positionnement s'accorde bien aux visées instrumentales de la nanomédecine. À l'inverse, les biologistes cellulaires et moléculaires, qui cherchent exclusivement à élucider des mécanismes et à comprendre des phénomènes, peuvent se sentir relégués au rang de « techniciens invisibles » (Shapin, 1989 ; Barley et Bechky, 1994) : « C'est difficile de poser des questions de biologie générale. Une grande partie du travail tourne autour de ce qu'on peut faire avec les nanoparticules, comment elles interagissent avec les cellules. Donc beaucoup de toxicologie et pas tant de grandes questions de biologie. » (Californie, Entretien 25, biologiste du développement). « On a souvent besoin de biologistes cellulaires, par exemple pour tout ce qui est trafic intracellulaire [...], d'immunologues. Mais ils ne viennent pas vers ce domaine-là facilement, parce que c'est très appliqué. On les utilise comme des sous-traitants, quoi. Ce n'est pas leur recherche. » (France, Entretien 13, chercheur en sciences pharmaceutiques).

Les disciplines qui étendent leur territoire au vivant valorisent les travaux de nanomédecine dans leurs revues : « La chimie, on est facilement gagnant, c'est vrai. Une petite donnée bio nous aide à faire toute la publi, et à passer dans un très bon journal de chimie. » (France, Entretien 33, chimiste). Cette reconnaissance s'illustre par le nombre d'articles publiés mais aussi par le prestige des revues et leur centralité dans la discipline. La comparaison des

²⁰ Cette trajectoire n'a rien d'exceptionnel, surtout aux États-Unis. Ainsi cinq scientifiques interviewés en Californie ont-ils commencé leur carrière dans l'industrie de la micro-électronique ou des télécommunications, avant de se tourner vers la recherche biomédicale. Plus généralement, la majorité des chercheurs rencontrés ont été formés en chimie, génie chimie, chimie des matériaux, génie mécanique, génie électrique, physique, physique appliquée ou biophysique. En Californie, 10 sur 25 sont biologistes de formation, dont 6 avec une double formation. En France, 14 sur 37 sont biologistes de formation et un seul a une double formation.

revues de chimie avec celles de biochimie et de biologie moléculaire²¹ montre ainsi que les premières figurent parmi les plus citées du domaine et qu'elles sont éditées par deux grandes associations professionnelles (American Chemical Society et Royal Society of Chemistry). Ce sont des revues de chimie prestigieuses, ou bien des revues de nanosciences également très reconnues en sciences des matériaux ou en physique²². À l'inverse, les revues de biochimie et de biologie moléculaire ne paraissent pas centrales : leur facteur d'impact les classe dans le deuxième ou le troisième quartile du domaine ; les éditeurs de biologie prestigieux (tels que Nature Publishing Group) en sont absents. Elles se positionnent clairement comme des revues faisant l'interface entre la biologie, la chimie et la science des matériaux, ce que montrent notamment la présence de l'American Chemical Society parmi les éditeurs, ainsi que le meilleur classement qu'elles obtiennent dans leurs autres domaines de rattachement (chimie, science des polymères, sciences des matériaux). Ainsi les biologistes valorisent-ils leurs recherches de nanomédecine dans des communautés interdisciplinaires formées autour de technologies ou d'applications biomédicales, ce qu'ils appréhendent au mieux comme un changement de trajectoire scientifique, au pire comme un déclassement : « Une grande partie de ce travail a été publiée dans des journaux centrés sur les nanos et sur les nouvelles thérapies. Donc plutôt des journaux de niche. Je ne publie pas ce travail dans les revues habituelles comme les journaux de biologie du développement. » (Californie, Entretien 25, biologiste du développement). « Ils ne font pas une biologie de prestige. Et ils ne publient pas dans les mêmes revues que les biologistes qui font... de l'embryologie, ou d'autres choses très fondamentales. » (France, Entretien 13, chercheur en sciences pharmaceutiques). Seuls les biologistes qui s'inscrivent déjà dans des communautés hybrides avec les sciences de l'ingénieur échappent à ce risque. Il s'agit notamment des bio-informaticiens, ainsi que des biologistes cellulaires qui, développant une nanomédecine proche de la biologie de synthèse, publient des articles sur les objets qu'ils ont créés²³.

Les sciences chimiques, physiques et de l'ingénieur élargissent aussi leur base de financement. Certains programmes les privilégient explicitement pour leur capacité à proposer des outils et méthodes génériques : « Les centres que nous invitons à constituer doivent avoir une forte composante d'ingénierie. C'est une caractéristique essentielle, parce qu'il s'agit d'une initiative d'ingénierie qui part d'une base biologique. » (Journée de lancement des NDC, 4 mai 2004). Plus généralement, elles sont favorisées par la priorité que donnent de nombreux appels d'offre aux applications technologiques et thérapeutiques et qui se traduit dans leurs critères d'éligibilité ou d'évaluation²⁴ : « À présent, les formulaires des NIH comportent tous une section "innovation". [Pour les ingénieurs qui ne viennent pas de la biologie traditionnelle] c'est plus facile d'obtenir une bourse qu'il y a cinq ou dix ans. » (Californie, Entretien 20, bio-

²¹ Voir en Annexe (Tableau A2). Nous avons cherché le classement de ces revues selon leur facteur d'impact dans le *Journal Citation Report* (base associée au Web of Science). Le facteur d'impact est calculé en divisant le nombre de citations dans l'année courante par le nombre total d'articles publiés dans les deux années précédentes.

²² En effet, les revues peuvent être rattachées à un seul ou à plusieurs domaines disciplinaires du Web of Science.

²³ Par exemple, l'article publié dans la revue *Nature Nano* à partir du projet *Repliement des protéines* est consacré à des assemblages protéiques que les auteurs ont créés en s'inspirant des propriétés d'auto-assemblage des protéines naturelles.

²⁴ Par exemple, les appels d'offre thématiques de l'ANR (*P2N*, *Techsanté*, *Nanobio*) ainsi que l'appel d'offre européen *EuronanoMed* exigent des partenariats industriels.

ingénieur). Par ailleurs, leur plasticité permet de multiplier les appels à projets auxquels elles peuvent répondre, en cadrant différemment leur recherche selon les financeurs, ou en proposant plusieurs applications d'un même concept : « Selon [le financeur] à qui on demande de l'argent, on peut positionner ce que l'on fait dans un contexte plutôt biomédical, ou plutôt nanotechnologique. Nous proposons des plateformes technologiques qui peuvent s'appliquer aux biomatériaux, ou au biomédical » (Californie, Entretien 10, ingénieur chimique). Par comparaison, les biologistes tirent moins profit des financements dédiés à la nanomédecine. Certes, les projets interdisciplinaires leur ouvrent des opportunités mais, les biologistes ne définissant pas l'agenda de la recherche en nanomédecine, ils sont rarement nommés responsables scientifiques des projets financés : « Le porteur des projets interdisciplinaires, c'est souvent la science dure par rapport à la science molle ; donc ça va être le chimiste, associé avec le biologiste, pour être sûr que le projet vienne de la science fondamentale, vers les applications biologiques. » (France, Entretien 35, biologiste). Financer leur propre programme de recherches suppose de postuler à des appels d'offre plus ouverts en termes d'éligibilité mais aussi très concurrentiels (programmes blancs de l'ANR, bourses R01 du NIH, du Conseil européen de la recherche [ERC], etc.), et plus favorables aux approches disciplinaires (Whitley, 2010 ; Stephan, 2012) : « À part les ANR blanches, on est pas mal poussés à aller vers les industriels. Et la compétition pour les ANR blanches devient très très difficile. » (France, Entretien 14, biophysicien). « Les interfaces entre la biologie, les sciences physiques et l'ingénierie sont peu développées. Les biologistes sont parfois très conservateurs, notamment parce qu'ils sont financés par les NIH qui ne financent que ce qui est déjà à moitié fait. » (Californie, Entretien 4, chimiste et biologiste cellulaire et moléculaire).

Conclusion

Cet article a analysé, sur l'exemple de la nanomédecine, la manière dont l'interdisciplinarité transforme les institutions disciplinaires. Ce faisant, il apporte un éclairage peu présent dans les études contemporaines de sociologie des sciences centrées sur le travail scientifique interdisciplinaire, qui s'intéressent essentiellement à ses dimensions cognitives. Portant par ailleurs sur un domaine dans lequel les stratégies de disciplinarisation sont absentes, notre démarche se distingue de la tradition d'étude sur l'émergence des disciplines scientifiques. En l'absence d'enjeu disciplinaire pour la nanomédecine, nous nous sommes demandé dans quelle mesure l'interdisciplinarité pouvait constituer une ressource pour certains « programmes disciplinaires » (Lenoir, 1997) et ainsi consolider, voire étendre, des territoires disciplinaires. Il ne s'agit pas de voir l'interdisciplinarité comme une pure stratégie au service d'enjeux de pouvoir mais de s'intéresser à la manière dont elle modifie les structures d'opportunité dans lesquelles évoluent les communautés scientifiques (Dubois, 2012).

L'enquête empirique menée sur la nanomédecine nous a conduit à dégager deux modalités selon lesquelles l'interdisciplinarité alimente certains programmes disciplinaires. La première est liée aux pratiques interdisciplinaires. Au-delà du consensus sur ses vertus

scientifiques, certaines formes du travail interdisciplinaire apportent des ressources de démarcation (Gieryn, 1983) d'approches alternatives. Ainsi, en nanomédecine, la complémentarité des instruments de mesure et de caractérisation, ainsi que l'importation de méthodes et de modèles, se prêtent particulièrement bien à l'activation de schémas classiques d'oppositions disciplinaires (quantitatif *versus* qualitatif ; rationalité *versus* bricolage), au risque parfois d'une schématisation. La vision que certains chercheurs de nanomédecine donnent des méthodes prétendument traditionnelles de la biologie passe en effet sous silence la pluralité d'approches et de méthodes en sciences du vivant, ainsi que le caractère largement fractal – à la fois interne et externe aux disciplines – de la distinction entre approches « qualitatives » et « quantitatives », « molles » et « dures » (Abbott, 2006, p. 43 ; Dogan et Pahre, 1991). Le travail interdisciplinaire favorise ici une rhétorique qui mobilise une vision surannée des sciences, celle d'un arbre comtien du savoir hiérarchisant sciences descriptives et quantitatives, sciences des principes généraux et sciences du particulier (Petit, 1994).

La seconde modalité repose sur la manière dont les disciplines construisent leurs frontières et sur leur plus ou moins grande plasticité. Étudiant les conditions de réussite de certains programmes disciplinaires dans l'histoire des sciences, T. Lenoir relève l'importance de proposer une vision théorique suffisamment large pour conduire des recherches sur des fronts très différents (et ainsi pour s'établir dans plusieurs contextes institutionnels) (1997, p. 56). Nous soulignons ici que certaines disciplines développent des programmes de recherches propices à l'extension de leur juridiction et minorant la prise de risques des chercheurs qui investissent de nouveaux objets. Pour ces disciplines, la recherche interdisciplinaire offre alors des opportunités pour réussir des « hybridations de rôle » (Ben-David et Collins, 1966). En nanomédecine, la plasticité des sciences chimiques, physiques et des sciences de l'ingénieur (absence de délimitation par une classe d'objets ou de phénomènes, de définition en termes de recherche fondamentale ou appliquée) facilite le déplacement des chercheurs vers de nouveaux objets, pour lesquels ils assoient leur position d'innovateurs en important des méthodes et des techniques de leur ancien rôle (*ibid.*, p. 459) et bénéficient d'une forte légitimité au sein de leurs instruments disciplinaires.

Au total, cette étude nous conduit à réfuter tout lien univoque entre développement de l'interdisciplinarité et affaiblissement des institutions disciplinaires, et à mettre en évidence la capacité de certaines disciplines à déplacer et à maintenir leurs frontières. Ces conclusions corroborent la perspective différenciationniste sur les sciences (Shinn et Ragouet, 2005) et invitent à analyser les dynamiques institutionnelles en sciences comme le résultat conjoint d'opérateurs de différenciation et d'unification. Par ailleurs, nous soulignons que l'interdisciplinarité transforme les territoires des disciplines sous l'effet de dynamiques endogènes et exogènes, sans qu'il soit possible de les hiérarchiser. D'un côté, les disciplines trouvent, dans le travail interdisciplinaire et dans ses ambitions, des ressources pour circonscrire le périmètre des données, problèmes et solutions pertinents, maîtriser la définition d'agendas scientifiques et sécuriser l'obtention de formes de reconnaissance. De l'autre, elles entretiennent une proximité, plus ou moins grande, avec des agendas institutionnels et politiques qui renforce ou affaiblit la légitimité de leurs programmes de recherche, consolide ou fragilise leurs institutions disciplinaires. Ainsi les sciences chimiques, physiques et les

sciences de l'ingénieur se trouvent-elles au centre des communautés d'attente (Van Lente et Rip, 1998 ; Hedgecoe et Martin, 2003), d'espoir (Brown, 2003), ou de promesses (Borup *et al.*, 2006), constituées autour de la nanomédecine ; elles sont favorisées par la domination progressive de la vision instrumentale au sein du soutien institutionnel aux nanotechnologies. Tandis que les premiers financements français et européens visaient à structurer des communautés interdisciplinaires et à établir les bases de connaissance²⁵, les programmes actuels poursuivent l'objectif de constituer un portefeuille de technologies et de mettre au point des applications thérapeutiques²⁶ : « Ces dernières années, une “boîte à outils” a été créée qui est maintenant disponible pour poursuivre la R&D en nanomédecine. À partir de ces acquis en recherche, lors de la prochaine étape, l'accent sera mis davantage sur la traduction de l'innovation. » (*ETP Nanomédecine*, 2011). De même, aux États-Unis, les financements de la nanomédecine sont progressivement conditionnés par la réalisation d'objectifs cliniques²⁷. Ainsi ces disciplines sortent-elles renforcées du virage applicatif des politiques de recherche et d'innovation dédiées aux nanotechnologies – alors même que celui-ci, par analogie directe avec le passage au « mode 2 » de production des connaissances (Gibbons *et al.*, 1994), prétend faire disparaître les territoires disciplinaires : « 1. La phase de fondation (2001-2010) a été ciblée sur une recherche interdisciplinaire à l'échelle nanométrique [...] Dominée par un écosystème centré sur la science, cette phase peut être appelée “Nano 1”. 2. La seconde phase de fondation (2011-2020) sera ciblée sur l'intégration de la science et de l'ingénierie à l'échelle nanométrique [...]. On s'attend à ce qu'elle soit dominée par un écosystème de R&D poussé par des considérations socio-économiques ; on pourra l'appeler “nano 2”. » (Roco, Mirkin et Hersam, 2010, chap. intro., p. 42).

ANNEXE

ENCADRE A1. – *Méthode d'identification des publications en nanomédecine dans le Web of Science*

Nous avons défini les publications en nanomédecine comme celles utilisant des nanotechnologies et mentionnent une application biomédicale. Nous avons recherché ces publications dans le Web of Science en combinant deux équations de recherche :

²⁵ En 2004, sous l'égide du 6^e programme-cadre, est ainsi créé *Nano2Life*, le premier réseau d'excellence européen dans les nano-biotechnologies associant 23 organismes de recherche et 20 entreprises.

²⁶ En 2009, le gouvernement français lance notamment le plan national *Nano-Innov*, qui vise à « donner à l'industrie française les moyens de réussir le virage des nanotechnologies » et comporte une plateforme en nanomédecine sur le campus de Saclay. S'y ajoutent des actions du programme *Investissements d'avenir*, ainsi que des initiatives financées par les collectivités locales (à Grenoble, Toulouse, etc.). La même année, les appels à projet *Euronanomed* (action *ERA-NET* qui vise à développer les collaborations internationales et interdisciplinaires) sont lancés dans le cadre du 7^e programme-cadre européen pour « réduire la durée entre les résultats de la recherche et les applications cliniques ou industrielles, pour le bénéfice du patient ».

²⁷ C'est notamment le cas des NDC à partir de 2008 (« La cible s'est déplacée vers l'application de l'information biologique fondamentale à des problèmes cliniques spécifiques. » [Roco, Mirkin et Hersam, 2010, p. 430]), ainsi que des centres de recherche financés par le National Cancer Institute à partir de 2010.

– celle établie pour identifier les publications en nanotechnologies (Grieneisen et Zhang, 2011). Cette équation comporte trois éléments principaux : recherche des publications qui comportent le terme « nano » dans le titre, le résumé et les mots-clés ; soustraction de celles qui ne relèvent manifestement pas du domaine des nanotechnologies (par exemple, *nanoliter*) ; ajout de mots-clés qui entrent dans le champ des nanotechnologies (par exemple *quantum dots*, fullerènes, dendrimères, etc.).

– celle établie pour identifier les applications biomédicales aux nanotechnologies (Wagner *et al.*, 2006).

Ce travail étant un peu daté, nous n'avons repris que les termes indiquant des visées générales ainsi que les principales applications (environ 75 termes, tels que délivrance de médicaments, imagerie, ciblage, régénération, implant, cancer, VIH, cardio-vasculaire, etc.).

TABLEAU A1. – Cinq premières catégories de rattachement des publications mentionnant un financement français ou américain dans le Web of Science

Origine du financement Catégories du Web of Science	France*	États-Unis**
Chemistry multidisciplinary	22	24,2
Materials science multidisciplinary	16,2	21,4
Nanoscience nanotechnology	12,8	18,9
Chemistry physical	14,6	18,2
Biochemistry molecular biology	14	9,6

Note : * 1 400 publications mentionnant un financement par l'ANR, le CEA, le CNRS ou l'INSERM.

** 14 050 publications mentionnant un financement par le NIH, le NSF, le Department of Energy ou le Department of Defense.

TABLEAU A2. – Analyse des dix premières revues en chimie, en biochimie et en biologie moléculaire

Chimie	Nombre d'articles (en %)	Classement du facteur d'impact (parmi les 152 revues répertoriées)	Éditeur
<i>Langmuir</i>	10	31 ^e	American Chemical Society (ACS)
<i>Journal of the American Chemical Society</i>	6,9	11 ^e	ACS
<i>Journal of Controlled Release</i>	6,7	16 ^e (10/261 pharmacologie et pharmacie)	Controlled Release Society; Japan Society of Drug Delivery System
<i>Abstracts of Papers of the American Chemical Society</i>	5,4	-	ACS
<i>ACS Nano</i>	5,2	9 ^e (6/135 physicochimie) (9/241 sciences des matériaux) (5/69 nanosciences et nanotechnologies)	ACS
<i>Journal of Nanoscience and</i>	5,1	89 ^e	American Scientific

<i>Nanotechnology</i>		(133/241 sciences des matériaux) (49/69 nanosciences et nanotechnologies) (77/128 physique appliquée) (48/68 physique de la matière condensée)	Publishers
<i>Chemical Communications</i>	4,4	19 ^e	Royal Society of Chemistry (UK)
<i>Nanoscale</i>	3,1	20 ^e (19/241 sciences des matériaux) (12/69 nanosciences et nanotechnologies) (13/128 physique appliquée)	Royal Society of Chemistry (UK)
<i>Nano Letters</i>	3,1	8 ^e (8/241 sciences des matériaux) (5/135 physicochimie) (4/69 nanosciences et nanotechnologies) (5/128 physique appliquée) (6/68 physique de la matière condensée)	ACS
<i>Small</i>	3	15 ^e (14/241 sciences des matériaux) (11/135 physicochimie) (8/69 nanosciences et nanotechnologies) (9/128 physique appliquée) (10/68 physique de la matière condensée)	Wiley

Biochimie et biologie moléculaire	Nombre d'articles (en %)	Classement du facteur d'impact (parmi les 290 revues répertoriées)	Éditeur
<i>Biomacromolécules</i>	8,7	51 ^e (8/57 chimie organique) (4/83 science des polymères)	ACS
<i>Journal of Biological Chemistry</i>	5,9	62 ^e	ASBM
<i>Bioconjugate Chemistry</i>	4,6	64 ^e (13/75 méthodes de recherche biochimique) (27/152 chimie) (9/57 chimie organique)	ACS
<i>Biochemistry</i>	4,2	102 ^e	ACS
<i>Macromolecular Bioscience</i>	3	91 ^e (5/27 science des matériaux, biomatériaux) (9/83 science des polymères)	Wiley
<i>Biochemical and Biophysical Research Communications</i>	2,8	181 ^e (39/72 biophysique)	Elsevier
<i>Journal of Molecular Biology</i>	2,7	87 ^e	Elsevier
<i>Analytical Biochemistry</i>	2,4	166 ^e (32/75 méthodes de recherche en biochimie) (26/75 chimie analytique)	Elsevier
<i>Bioorganic Medicinal Chemistry</i>	2,4	136 ^e (20/59 chimie pharmaceutique) (16/57 chimie organique)	Pergamon-Elsevier
<i>International Journal of Biological Macromolécules</i>	1,9	163 ^e	Elsevier

Note : Lorsque la revue est rattachée à plusieurs domaines, le classement de son facteur d'impact dans ces domaines est indiqué en italique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABBOTT A., 1988, *The System of the Professions. An Essay on the Division of Expert Labor*, Chicago (IL), University of Chicago Press.
- ABBOTT A., 2006, « Le chaos des disciplines » dans J. BOUTIER, J.-C. PASSERON, J. REVEL (dir.), *Qu'est-ce qu'une discipline ?* Paris, Éditions de l'EHESS (trad. fr. par M. DROUET de : A. ABBOTT, 2001, « The Chaos of Disciplines », *Chaos of Disciplines*, Chicago[IL] University of Chicago Press, p. 3-33).
- AGNEW B., 1998, « NIH Plans Bioengineering Initiative », *Science*, 280, 5369, p. 1516-1518.
- ARKIN A. P., FLETCHER D. A., 2006, « Fast, Cheap and Somewhat in Control », *Genome Biology*, 7, 8, p. 114.
- BARLEY S. R., BECHKY B. A., 1994, « In the Backrooms of Science: The Work of Technicians in Science Labs », *Work and Occupations*, 21, 1, p. 85-126.
- BARRY A., BORN G., WESZKALNYS G., 2008, « Logics of Interdisciplinarity », *Economy and Society*, 37, 1, p. 20-49.

- BEN-DAVID J., COLLINS R., 1966, « Social Factors in the Origins of a New Science: The Case of Psychology », *American Sociological Review*, 31, 4, p. 451-465.
- BENSAUDE-VINCENT B., 2001, « The Construction of a Discipline: Materials Science in the United States », *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 31, 2, p. 223-248.
- BENSAUDE-VINCENT B., STENGERS I., 2001, *Histoire de la chimie*, Paris, La Découverte.
- BIONEST PARTNERS, 2008, *Étude des applications des nanotechnologies à la médecine*, étude réalisée pour le compte du LEEM.
- BLANCKAERT C., 2006, « La discipline en perspective. Le système des sciences à l'heure du spécialisme (XIX^e-XX^e siècles) » dans J. BOUTIER, J.-C. PASSERON, J. REVEL (dir.), *Qu'est-ce qu'une discipline ?* Paris, Éditions de l'EHESS, p. 117-148.
- BONACCORSI A., 2007, « Explaining Poor Performance of European Science: Institutions versus Policies », *Science and Public Policy*, 34, 5, p. 303-316.
- BONACCORSI A., 2010, « New Forms of Complementarity in Science », *Minerva*, 48, 4, p. 355-387.
- BORUP M., BROWN N., KONRAD K., VAN LENTE H., 2006, « The Sociology of Expectations in Science and Technology », *Technology Analysis & Strategic Management*, 18, 3/4, p. 285-298.
- BOURDIEU P., 1984, *Homo Academicus*, Paris, Éditions de Minuit.
- BROWN N., 2003, « Hope Against Hype-Accountability in Biopasts, Presents and Futures », *Science & Technology Studies*, 16, 2, p. 3-21.
- BRUNET P., DUBOIS M., 2012, « Cellules souches et technoscience : sociologie de l'émergence et de la régulation d'un domaine de recherche biomédicale en France », *Revue française de sociologie*, 53, 3, p. 391-428.
- CALVERT J., FUJIMURA J., 2011, « Calculating Life? Duelling Discourses in Interdisciplinary Systems Biology », *Studies in History and Philosophy of Science part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 42, 2, p. 155-163.
- CALVERT J., 2006, « What's Special about Basic Research? », *Science, Technology and Human Values*, 31, 2, p. 199-220.
- CALVERT J., 2013, « Engineering Biology and Society: Reflections on Synthetic Biology », *Science Technology & Society*, 18, 3, p. 405-420.
- CAMBROSIO A., KEATING P., 1983, « The Disciplinary Stake: The Case of Chronobiology », *Social studies of Science*, 13, 3, p. 323-353.
- CONESA M., LACOUR P.-Y., ROUSSEAU F., THOMAS J.-F. (dir.), 2013, *Faut-il brûler les humanités et les sciences humaines et sociales ?* Paris, Michel Houdiard éditeur.
- CRANE D., 1972, *Invisible Colleges: Diffusion of Knowledge in Scientific Communities*, Chicago (IL), University of Chicago Press.
- DE BECHILLON D., 1997, « La notion de transdisciplinarité », *Revue du Mauss*, 10.
- DALGALARRONDO S., GAUDILLIERE J.-P., MOISDON J.-C., PIGNARRE P., PITCHEN P., WERMUTH C. G., CHAUVEAU S., GASTALDI L., 2004, « Problèmes et enjeux contemporains de l'innovation thérapeutique », *Entreprises et histoire*, 36, 2, p. 120-149.
- DOGAN M., PAHRE R., 1991, *L'innovation dans les sciences sociales : la marginalité créatrice*, Paris, Presses universitaires de France.

- DUBOIS M., 2012, *Social Dynamics of Biomedical Research. An Actionist Perspective on the Sociology of science*, Oxford, Bardwell Press.
- DUBOIS M., 2014, « *Private Knowledge* et “programme disciplinaire” en sciences sociales : étude de cas à partir de la correspondance de Robert K. Merton », *L'Année sociologique*, 64, 1, p. 79-119.
- EUROPEAN SCIENCE FOUNDATION, 2004, *Nanomedicine. An ESF–European Medical Research Councils (EMRC) Forward Look Report*, Strasbourg, France ESF.
- EUROPEAN TECHNOLOGY PLATFORM (ETP) ON NANOMEDICINE, 2005, *Vision Paper and Basis for a Strategic Research Agenda for NanoMedicine*, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities.
- EUROPEAN TECHNOLOGY PLATFORM (ETP) ON NANOMEDICINE, 2011, *Improving Translation of Public Healthcare Nano-Research in Europe*. Livre Blanc pour le programme-cadre Horizon 2020.
- FABIANI J.-L., 2006, « À quoi sert la notion de discipline ? » dans J. BOUTIER, J.-C. PASSERON, J. REVEL (dir.), *Qu'est-ce qu'une discipline ?* Paris, Éditions de l'EHESS.
- FUJIMURA J., 2005, « Postgenomic Futures: Translations Across the Machine-Nature Border in Systems Biology », *New Genetics and Society*, 24, 2, p. 195-225.
- GALISON P., 1997, *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics*, Chicago (IL), University of Chicago Press.
- GAUDILLIERE J.-P., 2002, *Inventer la biomédecine. La France, l'Amérique et la production des savoirs du vivant (1945-1965)*, Paris, La Découverte.
- GIBBONS A., LIMOGES C., NOWOTNY H., SCHWARZMAN S., SCOTT P., TROW M., 1994, *The New Production of Knowledge, The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies*, London, Sage Publications.
- GIERYN T. F., 1978, « Problem Retention and Problem Change in Science », *Sociological Inquiry*, 48, 3-4, p. 96-115.
- GIERYN T. F., 1983, « Boundary-Work and the Demarcation of Science from Non-Science: Strains and Interests in Professional Ideologies of Scientists », *American Sociological Review*, 48, 6, p. 781-795.
- GODIN B., GINGRAS Y., 2000, « The Place of Universities in the System of Knowledge Production », *Research Policy*, 29, 2, p. 273-278.
- GRIENEISEN M. L., ZHANG M., 2011, « Nanoscience and Nanotechnology: Evolving Definitions and Growing Footprint on the Scientific Landscape », *Small*, 7, 20, p. 2836-2839.
- GRIENEISEN M. L., 2010, « The Proliferation of Nano Journals », *Nat Nano*, 5, 12, p. 825.
- GROSSETTI M., 2000, « Introduction : Sciences et “demandes sociales” au tournant du siècle », *Sciences de la société, Production scientifique et demande sociale*, 49, p. 3-10.
- GUESPIN-MICHEL J., RIPOLL C. 2000, « La pluridisciplinarité dans les sciences de la vie : un nouvel obstacle épistémologique, la non-linéarité », *ASTER, Rencontres entre les disciplines*, 30, p. 87-104.
- HACKETT E., CONZ D., PARKER J., BASHFORD J., DELAY S., 2004 « Tokamaks and Turbulence: Research Ensembles, Policy and Technoscientific Work », *Research Policy*, 33, 5, p. 747-767.

- HEDGECOE A., MARTIN P., 2003, « The Drugs Don't Work: Expectations and the Shaping of Pharmacogenetics », *Social Studies of Science*, 33, 3, p. 327-364.
- JOERGES B., SHINN T., 2001, *Instrumentation between Science, State and Industry*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- JONES R. A. L., 2004, *Soft Machines: Nanotechnology and Life*, Oxford, Oxford University Press.
- JONG S., 2008, « Academic Organizations and New Industrial Fields: Berkeley and Stanford after the Rise of Biotechnology », *Research Policy*, 37, 8, p. 1267-1282.
- JOUVENET M., 2007, « La culture du "bricolage" instrumental et l'organisation du travail scientifique. Enquête dans un centre de recherche en nanosciences », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 1, 2, p. 189-219.
- KNORR-CETINA K. D., 1982, « Scientific Communities or Transepistemic Arenas of Research? A Critic of Quasi Economic Models of Science », *Social Studies of Science*, 12, 1, p. 101-130.
- LEMAINE G., MACLEOD R., MULKAY M., WEINGART P. (eds.), 1976, *Perspectives on the Emergence of Scientific Disciplines*, La Haye, Mouton & Co.
- LENOIR T., 1997, *Instituting Science: The Cultural Production of Scientific Disciplines*, Berkeley (CA), Stanford University Press.
- LÖWY I., 1990, « The Strength of Loose Concepts-boundary Concepts, Federative Experimental Strategies and Disciplinary Growth: The Case of Immunology », *History of Science*, 30, 90, p. 371-396.
- MARCOVICH A., SHINN T., 2011, « Where is Disciplinarity Going? Meeting on the Borderland », *Social Science Information*, 50, 3-4, p. 582-606.
- MERTON R. K., 1973, *The Sociology of Science. Theoretical and Empirical Investigations*, Chicago (IL), University of Chicago Press.
- MINEFI, 2011, *Technologies clés 2015*, Paris, La Documentation française.
- MIRKIN C. A., NEL A., THAXTON C. S., 2011, « Applications: Nanobiosystems, Medicine and Health » dans M. C. ROCO, C. A. MIRKIN, M. C. HERSAM (eds.), *Nanotechnology: Research Directions for Societal Needs in 2020. Retrospective and Outlook*, Berlin, Springer, p. 221-281.
- MORANGE M., 1994, *Histoire de la biologie moléculaire*, Paris, La Découverte.
- MULLINS N., 1972, « Development of a Scientific Specialty. The Phage Group and the Origins of Molecular Biology », *Minerva*, 10, 1, p. 51-82.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2003, *Bio 2010, Transforming Undergraduate Education for Future Research Biologists*, Washington (DC), National Academic Press.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2009, *A New Biology for the 21st Century*, Washington (DC), The National Academies Press.
- NOVEMBER J., 2012, *Biomedical Computing: Digitizing Life in the United States*, Baltimore (MD), Johns Hopkins University Press.
- OPECST, 2004, *Nanosciences et progrès médical, Rapport d'information au Sénat*, 293, rapporteurs : J.-L. LORRAIN et D. RAOUL, Paris, OPECST.
- PENDERS B., HORSTMAN K., VOS R., 2008, « Walking the Line between Lab and Computation: The "Moist" Zone », *BioScience*, 58, 8, p. 747-755.

- PETIT A., 1994, « Genèse de la classification des sciences d'Auguste Comte », *Revue de synthèse*, 115, 1-2, p. 71-102.
- RAFOLS I., MEYER M., 2007, « How Cross-Disciplinary is Bionanotechnology? Explorations in the Specialty of Molecular Motors », *Scientometrics*, 70, 3, p. 633-650.
- RAMUNNI G., 1995, *Les sciences pour l'ingénieur. Histoire du rendez-vous des sciences et de la société*, Paris, Éditions du CNRS.
- ROCO M. C., BAINBRIDGE W. C., 2002, « Converging Technologies for Improving Human Performance: Integrating from the Nanoscale », *Journal of Nanoparticle Research*, 4, 4, p. 281-295.
- ROCO M. C., MIRKIN C. A., HERSAM M. C., 2010, *Nanotechnology. Research Directions for Societal Needs in 2020. WTEC Panel Report*, Lancaster (PA), WTEC.
- SCHUMMER J., 2004, « Multidisciplinarity, Interdisciplinarity, and Patterns of Research Collaboration in Nanoscience and Nanotechnology », *Scientometrics*, 59, 3, p. 425-465.
- SHAPIN S., 1989, « The Invisible Technician », *American Scientist*, 77, 6, p. 554-563.
- SHINN T., 2000, « Axes thématiques et marchés de diffusion. La science en France, 1975-1999 », *Sociologie et sociétés*, 32, 1, p. 43-69.
- SHINN T., RAGOUET P., 2005, *Controverses sur la science : pour une sociologie transversaliste de l'activité scientifique*, Paris, Raisons d'agir.
- STAR S. L., GRIESEMER J. R., 1989, « Institutional Ecology, "Translations" and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-1939 », *Social Studies of Science*, 19, 3, p. 387-420.
- STEPHAN P. E., 2012, *How Economics Shapes Science*, Cambridge (MA), Harvard University Press.
- STICHWEH R., 1994, « La structuration des disciplines dans les universités allemandes du XIX^e siècle », *Histoire de l'éducation*, 62, p. 55-73.
- STOKES D. E., 1997, *Pasteur's Quadrant: Basic Science and Technological Innovation*, Washington (DC), Brookings Institution Press.
- STRASSER B. J., 2007, « Collectionner ou expérimenter ? Les bases de données bio-informatiques dans les sciences du vivant » dans C. JACOB (dir.), *Lieux de savoir*. Tome 1 : *Espaces et communautés*, Paris, Albin Michel, p. 681-703.
- STRASSER B. J., 2012, « Data-Driven Sciences: From Wonder Cabinets to Electronic Databases », *Studies in the History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 43, 1, p. 85-87.
- TEISSIER P., 2010, « Solid-State Chemistry in France: Structures and Dynamics of a Scientific Community Since World War II », *Historical Studies in the Natural Sciences*, 40, 2, p. 225-258.
- TIBELL L. A. E., RUNDGREN C.-J., 2010, « Educational Challenges of Molecular Life Science: Characteristics and Implications for Education and Research », *CBE-Life Sciences Education*, 9, 1, p. 25-33.
- TROMPETTE P., VINCK D., 2009, « Retour sur la notion d'objet-frontière », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 3, 1, p. 5-27.
- VAN LENTE H., RIP A., 1998, « The Rise of Membrane Technology: From Rhetorics to Social Reality », *Social Studies of Science*, 28, 2, p. 221-254.

- VINCK D., 1999, « Les objets intermédiaires dans les réseaux de coopération scientifique. Contribution à la prise en compte des objets dans les dynamiques sociales », *Revue française de sociologie*, 40, 2, p. 385-414.
- VINCK D., 2000, *Pratiques de l'interdisciplinarité : mutations des sciences, de l'industrie et de l'enseignement*, Grenoble, Presses universitaires de Grenoble.
- WAGNER V., DULLAART A., BOCK A.-K., ZWECK A., 2006, « The Emerging Nanomedicine Landscape », *Nature Biotechnology*, 24, 10, p. 1211-1217.
- WEBSTER T. J., 2006, « Nanomedicine: What's in a Definition? », *International Journal of Nanomedicine*, 1, 2, p. 115-116.
- WEINGART P., STEHR N. (eds.), 2000, *Practising Interdisciplinarity*, Toronto, University of Toronto Press.
- WHITLEY R., 1976, « Umbrella and Polytheistic Scientific Disciplines and their Elites », *Social Studies of Science*, 6, 3/4, p. 471-497.
- WHITLEY R., 2003, « Competition and Pluralism in the Public Sciences: The Impact of Institutional Frameworks on the Organisation of Academic Science », *Research Policy*, 32, 6, p. 1015-1029.
- WHITLEY R., 2010, « Reconfiguring the Public Sciences. The Impact of Governance Changes on Authority and Innovation in Public Science Systems » dans R. WHITLEY, J. GLÄSER, L. ENGWALL (eds.), *Reconfiguring Knowledge Production. Changing Authority Relationships in the Sciences and their Consequences for Intellectual Innovation*, Oxford, Oxford University Press, p. 3-47.