

Emergence des nanotechnologies : Vers un nouveau ”modèle industriel ”?

Philippe Larédo, Carole Rieu, Lionel Villard, Bernard Kahane, Aurélie
Delemarle, Corine Genet, Vincent Mangematin

► **To cite this version:**

Philippe Larédo, Carole Rieu, Lionel Villard, Bernard Kahane, Aurélie Delemarle, et al.. Emergence des nanotechnologies : Vers un nouveau ”modèle industriel ”?. Ph. Laredo, J.-Ph. Leresche et K. Weber. L'internationalisation des systèmes de recherche en action. Les cas français et Suisse, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 24 p., 2009. <hal-00424261>

HAL Id: hal-00424261

<http://hal.grenoble-em.com/hal-00424261>

Submitted on 14 Oct 2009

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.

CHAPITRE 16

EMERGENCE DES NANOTECHNOLOGIES : VERS UN NOUVEAU « MODELE INDUSTRIEL » ?

Philippe Larédo, Carole Rieu, Lionel Villard, Bernard Kahane, Aurélie Delemarle, Corine Genet et Vincent Mangematin

1. INTRODUCTION

Les technologies émergentes comme la microélectronique des années 70, les biotechnologies des années 80-90 ou les nanotechnologies des années 2000 s'expriment sous forme de vagues technologiques (Kahane, 2008) qui sont porteuses de promesses scientifiques et techniques (Pautrat, 2002), de nouveaux marchés, de perspectives de bien-être pour certains (Birraux et al., 2003), de risques, d'incertitudes et d'aliénation pour d'autres (Dupuy et al., 2004). Alors que le développement économique des nanotechnologies ne fait que commencer, plusieurs schémas de développement sont envisageables (Kahane, Mangematin, 2007). Ils présentent trois différences majeures¹ :

- La première porte sur la place respective accordée aux firmes installées (typiquement de grandes firmes industrielles) et aux nouveaux entrants (start-ups). Pour Zucker et al. (2007), les nanotechnologies constituent une rupture (au sens de Griliches) comparable aux biotechnologies pour l'industrie pharmaceutique. A ce titre, elles menacent le leadership des firmes en place car elles dévalorisent leurs compétences (Hill et al.,

¹ Cet article s'appuie sur les travaux menés dans le cadre du programme Nanobench qui rassemble des chercheurs de l'UMR ENPC-UMLV-ESIEE-CNRS (A. Delemarle, B. Kahane, P. Larédo, L. Villard) et de l'UMR INRA Université de Grenoble GAEL (E. Avenel, C. Collet, V. Mangematin, C. Rieu) et de Grenoble Ecole de Management (C. Genet). Ce programme a été financé par le CEA, la Commission européenne (réseau d'excellence PRIME). Depuis 2008 et jusqu'en 2011, il est soutenu par l'ANR.

2003), tandis qu'elles créent des opportunités d'entrée pour de nouvelles firmes (Shea, 2005). Ces auteurs parient donc sur un rôle clé joué par les start-ups dans le développement économique des nanotechnologies. Cependant, les nanotechnologies, contrairement aux biotechnologies, reposent sur des avancées technologiques antérieures et sur les acteurs qui les maîtrisent, notamment les grandes firmes. En cela, le développement des nanotechnologies rappelle les premières phases de développement de la microélectronique dans les années 60 et 70. Abernathy et Utterback (Abernathy et al., 1978) ont montré le rôle essentiel que de grandes firmes telles que Fairchild Semiconductors, IBM and Texas Instruments y ont joué. Ceci suggère une place prépondérante des grandes firmes tant dans l'exploitation commerciale que dans l'exploration des potentiels des nanotechnologies.

- La deuxième concerne le degré de concentration géographique des nanotechnologies. Zucker et Darby (1998) ainsi que Audretsch (2001) insistent sur la proximité avec les centres d'excellence et les scientifiques de grand renom qui exercent un fort pouvoir d'attraction. A l'inverse, les travaux sur la micro-électronique font ressortir le poids des grandes entreprises, notamment parce que nombre de start-ups sont des essaimages de grands groupes (Nuttal, 2007). Les travaux sur les nanotechnologies soulignent la forte concentration géographique autour de quelques clusters que nous appelons nanodistricts. Robinson et al. (2007) émettent l'hypothèse que la dynamique de concentration géographique repose principalement sur la disponibilité conjointe d'équipements de recherche et de production de haut niveau réunis à proximité les uns des autres (agglomérations technologiques). Les auteurs insistent sur les compétences qui se sont constituées autour de ces équipements et qui représentent, pour les acteurs de la région, un avantage déterminant.
- Enfin, la troisième différence tient à la division du travail entre les acteurs, au profil de collaboration et plus généralement à l'organisation industrielle dans les nanotechnologies. Les nanotechnologies sont le plus souvent définies de manière très simple comme la capacité de travailler à l'échelle du nanomètre. Elles couvrent des champs scientifiques et techniques divers (physique, ingénierie, biologie moléculaire et chimie) dont elles franchissent les limites pour utiliser les propriétés fondamentales de la matière à l'échelle nanométrique. Ainsi, elles ne constituent pas simplement la

somme de ces disciplines, mais le résultat de leur convergence (Nordmann, 2004).

Le chapitre est organisé de la façon suivante pour discuter ces hypothèses. Toutes les nouvelles vagues technologiques s'inscrivent à la fois dans la continuité des inventions précédentes et en rupture par rapport à l'existant. Les décisions stratégiques et la définition des politiques économiques d'accompagnement se fondent souvent sur les caractéristiques similaires de chaque phase d'émergence. En même temps, Larédo (Cf. chapitre 1 dans cet ouvrage) met en exergue les aspects spécifiques associés à chacune des émergences précédentes. La première partie s'efforce donc de caractériser les dynamiques S&T à l'œuvre dans les nanotechnologies, en utilisant comme cadre d'analyse les régimes de recherche proposés par Bonaccorsi (2008). Cela nous conduira à insister sur les similarités avec les technologies de l'information et les biotechnologies, en particulier à propos des rythmes de croissance, de l'existence de convergences inter-domaines, et de complémentarités institutionnelles. Nous présenterons ensuite ce qui, à notre sens, constitue les spécificités des dynamiques à l'œuvre. Lors de la phase d'émergence, l'investissement dans les nouvelles technologies repose sur un double pari : scientifique et technique d'abord, en espérant que les promesses des nouvelles technologies donneront lieu à de nombreux développements ultérieurs ; économiques ensuite, en escomptant que les nouvelles technologies permettront de gagner ou de créer de nouveaux marchés. Pouvoirs publics et entreprises investissent alors pour être parties prenantes de ce mouvement.

La deuxième partie de ce chapitre s'interroge donc sur les modalités de ce double pari : les nanotechnologies empruntent-elles une voie similaire à celle des biotechnologies, fondée sur la création de *start-ups* valorisant les découvertes scientifiques, ou plutôt à la voie suivie par la micro-électronique, où l'engagement des grands groupes industriels a été déterminant ? Les technologies de l'information et la globalisation accélérée des grandes firmes et de bon nombre de marchés ont conduit certains analystes à parler de « monde plat » pour qualifier cet accroissement des mouvements et le déploiement d'acteurs, de connaissances et de produits sans considération des frontières. La montée des pays émergents (et en particulier du quatuor des BRIC) comme les approches de l'OMC qui visent à lever les barrières entravant les marchés des connaissances et des technologies, viennent conforter ce discours. Qu'en est-il de

cette nouvelle vague ? Retrouve-t-on la focalisation classique autour de la triade, et en son sein, dans les lieux qui ont été au cœur des précédentes vagues ? Ou bien faisons-nous place à une large répartition des efforts, comme peut le laisser penser la prolifération des programmes nationaux sur les nanotechnologies (dont plus de 50 pays sont dotés) ?

La troisième partie présentera nos résultats sur les phénomènes d'agglomération observés, en particulier l'importance d'un petit nombre de clusters fortement interconnectés. La conclusion discute des implications potentielles de ces développements sur l'internationalisation des systèmes de recherche.

2. SIMILARITES ET DIFFERENCES DANS LES « REGIMES DE RECHERCHE »

Au-delà du caractère idiosyncratique de chacune des révolutions scientifiques, Bonaccorsi (2008) définit les caractéristiques des révolutions scientifiques et techniques par trois composantes : le taux de croissance, le degré de convergence et le niveau de complémentarité (cf. chapitre 1 dans cet ouvrage). Le taux de croissance des connaissances scientifiques dépend principalement de la dynamique scientifique, i.e. les questions non résolues, les vides théoriques, la présence d'utilisateurs insatisfaits (cryptographie en temps de guerre par exemple) ou la disponibilité de l'instrumentation. Un des points de blocage de la progression des connaissances scientifiques réside dans le lien entre observation et manipulation. Lorsque la manipulation et l'expérimentation sont requises pour produire des observations valides, la disponibilité d'outils ou d'équipements est essentielle. C'était l'un des enjeux soulignés par les scientifiques lors du débat sur l'installation d'un synchrotron en Ile-de-France pour la physique. Cela fut aussi un des enjeux des biotechnologies, avec le développement des génopoles qui ont assuré un rattrapage en termes d'instrumentation pour les biologistes français.

La mise au point de nouveaux instruments scientifiques marque l'émergence des nanotechnologies au tournant des années 1990. Les inventions du microscope à effet tunnel (STM) et du microscope à Force Atomique (AFM) constituent de puissants outils pour explorer la matière à l'échelle nanométrique et marquent ainsi le point de départ du développement des nanotechnologies. Il y a trente ans, la biotechnologie émergeait, elle aussi,

suite à la mise au point de nouveaux outils - les anticorps monoclonaux et la PCR - qui permettaient une exploration systématique du vivant au niveau des gènes. Cependant, à l'inverse des biotechnologies qui puisent leur origine dans la biologie et seulement marginalement dans la chimie et la physique, les nanotechnologies trouvent leurs racines dans le travail à l'échelle nanométrique qui affecte plusieurs disciplines (physique, chimie, micro-électronique, biotechnologies). Dans chacune des disciplines, le passage à l'échelle nanométrique permet de nouveaux développements et génère de nouvelles questions scientifiques. De nouveaux liens entre les disciplines sont tissés, ouvrant de nouveaux horizons scientifiques, autour de deux grandes approches : top-down et bottom-up.

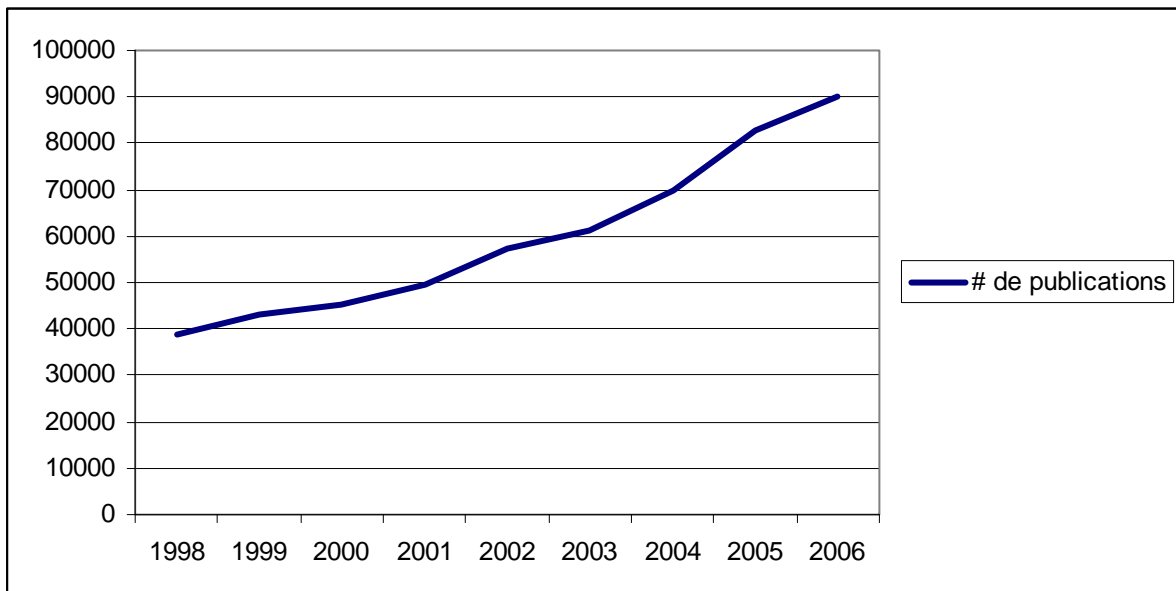
L'approche top-down s'inscrit dans la lignée de la loi de Moore² en microélectronique, prolongeant le mouvement existant de réduction de la taille et d'augmentation de la densité des circuits au sein des semi-conducteurs. L'augmentation des rendements est obtenue par la hausse du nombre de circuits intégrés par wafer³ tandis que la puissance associée à chaque circuit intégré s'accroît. Les approches bottom-up empruntent des procédés de fabrication et de manipulation issus selon les cas de la physique, de la chimie ou de la biologie. En systématisant ce qui a été fait jusqu'à maintenant de manière artisanale dans les biotechnologies, le travail de la matière à l'échelle atomique et moléculaire permet de concevoir et de réaliser de manière prédictible et ordonnée des matériaux et des assemblages aux fonctionnalités et propriétés nouvelles. Il est par exemple possible de concevoir des médicaments dont les molécules ont une structure précise avec un positionnement prévisible de chaque atome pour limiter les effets indésirables dus à une hybridation avec des molécules autres que la cible.

² La loi de Moore stipule que la taille des circuits intégrés est divisée par deux tous les dix-huit mois alors que simultanément leur puissance double.

³ Les wafers sont les disques de silicium très fins à la composition homogène et étroitement contrôlée sur lesquelles l'application de masques successifs permet d'organiser la gravure des circuits électroniques.

La figure 1 témoigne de l'explosion de la production scientifique relative aux nanotechnologies, qui croît de manière exponentielle depuis le milieu des années 90. Les nouveaux outils permettent d'améliorer les capacités de recherche existantes, d'augmenter la finesse et le grain de l'analyse, d'accroître les possibilités et la vitesse de diagnostic dans le vivant, de poursuivre les tendances précédentes de réduction de la taille dans la microélectronique et d'augmentation de la prédictibilité en biologie. Le passage à l'échelle nanométrique s'accompagne de nouvelles interrogations scientifiques et ouvre de nouvelles questions de recherche qui agrège de nouveaux acteurs.

Figure 1 : Evolution du nombre d'articles



Source : www.nanotrendchart.org

Encadré 1 sur les données

Afin de décrire le développement des nanotechnologies, nous avons construit une base de données portant sur les publications, les brevets et les entreprises impliquées dans les nanotechnologies au niveau mondial. Nous avons utilisé l'équation de recherche publiée dans *Research Policy* (Mogoutov et Kahane, 2007) pour identifier les publications du *web of science* relative aux nanotechnologies entre 1998 et 2006. 583000 publications ont ainsi été extraites. De la même manière, nous avons extrait les brevets relatifs aux nanotechnologies de la base PATSTAT. L'identification des firmes de nanotechnologies et la description de leurs bases de connaissance dans ce domaine a nécessité une démarche spécifique compte tenu de l'absence jusqu'à récemment des nanotechnologies en tant que domaine dans les classifications établies. Notre liste de firmes est construite à

partir de trois sources : (1) les firmes qui ont déposé au moins un brevet relatif aux nanotechnologies, (2) les firmes qui ont au moins une publication référencée dans le *Web of Knowledge* dans le domaine des nanotechnologies, (3) les firmes apparaissant sur les sites NanoVIP et Nano-Invest.

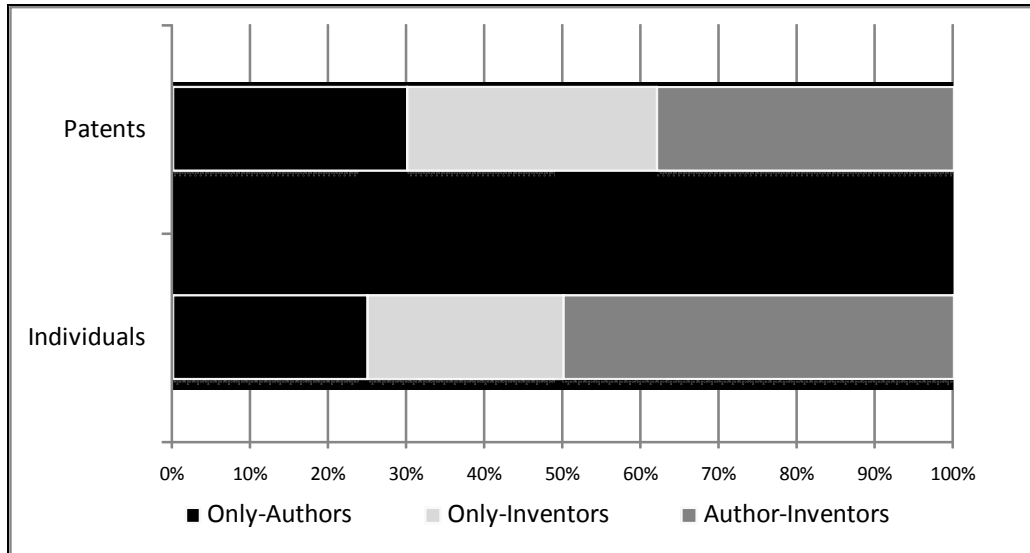
Le degré de convergence ou de divergence des recherches scientifiques dépend de la maturité du champ. Dans la période d'émergence - pré-paradigmatique (Kuhn, 1970), la recherche explore une multitude d'hypothèses qui se trouvent en compétition les unes avec les autres. Des nombreux emprunts aux autres disciplines sont réalisés et l'exploration se déroule dans un contexte où les frontières de la discipline évoluent rapidement. La progression des connaissances est rapide et divergente, c'est-à-dire que l'accumulation des connaissances est réalisée dans plusieurs directions, au sein de plusieurs trajectoires concurrentes. À l'inverse, dans une phase paradigmatique, c'est-à-dire lorsqu'un accord entre les scientifiques pour explorer un nombre limité d'hypothèses prometteuses existe, la communauté scientifique dans son ensemble partage les questions de recherches principales, dispose de méthodes similaires et publie dans un groupe de revues bien identifié. L'émergence d'un paradigme correspond à une forte réduction de la diversité au profit d'une théorie unifiée qu'il faut tester, enrichir et transformer en technologie. La progression de la connaissance est alors convergente, c'est-à-dire qu'elle permet une accumulation des résultats au sein d'un paradigme bien déterminé.

Pour l'instant, les recherches entreprises sur les nanotechnologies se font au sein de chaque discipline, dans l'approfondissement des technologies existantes dont elles renouvellent les perspectives de développement et d'application. On n'observe pas sur les dix dernières années de renforcement des liens ou d'interpénétration significative entre les disciplines constitutives des nanotechnologies. Au sein de chaque champ, des ruptures scientifiques se produisent mais la convergence entre différents champs de recherches, qui constitue la promesse scientifique et technique la plus forte, semble à ce stade être plus une potentialité qu'une réalité établie. Avenel et al. (2007) suggèrent qu'on ne constate pas ou pas encore d'évolution significative des convergences inter-domaines ni dans la recherche scientifique ni dans les technologies. La croissance actuelle renverrait donc à des développements parallèles permis par l'arrivée de nouveaux moyens de recherche partagés par tous (Schummer, 2004). Toutefois, cet indicateur

reste fragile. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer l'absence de convergence ou de divergence : la convergence a lieu dans les produits et échappe aux statistiques sur les publications et les brevets, les nanotechnologies sont une technologie générique qui est utilisée mais qui ne donne pas lieu à convergence. On assiste à un processus d'intégration dans une discipline-hôte, ou bien encore la convergence a lieu dans les petites entreprises qui publient et brevètent moins que les grandes, le phénomène passant largement inaperçu. Les travaux se poursuivent en la matière pour tester à plus grande échelle les hypothèses proposées par Rafols (2008) en matière de convergence.

Le niveau de complémentarité recouvre les liens et les interdépendances dans la mobilisation des équipements matériels, des ressources humaines et de différentes parties de la société (laboratoires de recherche académiques, industriels, opinion et pouvoirs publics) pour la recherche et l'innovation. Comme le chapitre 1 l'a souligné, les formes de complémentarités cognitives, techniques et institutionnelles ont fortement varié lors de chaque période d'émergence. Nous avons souligné l'importance des complémentarités techniques : les nanotechnologies réclament des plateformes technologiques importantes. Ces dernières sont cependant plus proches des situations actuellement rencontrées dans les biotechnologies (avec les génopoles) que dans la physique des hautes énergies : les investissements nécessaires n'ont rien à voir avec le LHC ou ITER, ils sont accessibles à tous les territoires proactifs, de la Flandre à la région Rhône-Alpes, pour ne citer que deux cas emblématiques à la fois de la microélectronique et des biotechnologies. Par ailleurs, les premiers travaux effectués sur les relations entre science et technique à travers les brevets (Bonaccorsi et Thomas, 2007) mettent clairement en exergue un niveau très fort d'hybridation en termes de ressources humaines. Le graphique ci-dessous montre que deux tiers des inventeurs dans les brevets sont également des auteurs d'articles académiques. Il montre également que les brevets se répartissent de manière assez égale entre brevets qui ne contiennent que des inventeurs académiques (ils ont tous publié), brevets d'inventeurs seuls (aucun n'a publié) et brevets mixtes avec les deux types d'inventeurs. Nous ferions donc face si ces premiers travaux sont validés à une intrication sans précédent de la fabrique des connaissances et des technologies. Cela a des incidences fortes à la fois sur les interventions publiques (un renforcement des programmes collaboratifs dès les phases d'émergence ?) et sur l'engagement des firmes dans la recherche, un point

central selon nous dans la dynamique actuelle.



Source : Bonaccorsi et Thomas, 2007 (construit sur un échantillon de 4800 brevets déposés à l'Office américain des brevets (USPTO) rassemblant 1900 déposants différents et plus de 8000 inventeurs dans 52 pays). La première ligne répartit l'ensemble des inventeurs selon leur engagement dans la recherche et/ou la technologie, la deuxième ligne opère une répartition des brevets selon les activités de leurs inventeurs.

Enfin, le passage de la recherche aux réalisations industrielles a souvent été source de débats violents, renvoyant à l'insertion de ces innovations de rupture dans la société et aux débats publics qu'elles suscitent. Après les oppositions frontales sur le nucléaire dans les années 70, l'introduction des biotechnologies végétales, notamment des OGM, a suscité des interrogations de la société. Les organisations non gouvernementales et les associations ont acquis une nouvelle légitimité auprès des pouvoirs publics qui ont été conduits à organiser de nouvelles formes de concertation. A côté des débats parlementaires sont apparues des consultations directes qui influencent les débats publics, les stratégies des entreprises et l'action des pouvoirs publics. Ces différents éléments, mis en place pour les biotechnologies, ont été très rapidement mobilisés pour les nanotechnologies. Cette convergence dans la mise sur agenda démocratique des nouvelles technologies renvoie cependant à un glissement

important : alors que les débats ont été cristallisés jusqu'à présent par l'introduction des nouveaux produits, ils ont émergé dès le stade des premières explorations scientifiques, autour d'anticipations très longues et de promesses à très long terme. Ce glissement renvoie à un réagencement de fait des calendriers entre production scientifique, innovation et régulation. Il déplace le « cadrage des marchés » (par les normes, les standards, les codes et les régulations étatiques – comme les autorisations de mise sur le marché des médicaments ou l'attribution de licences pour les opérateurs de télécommunications) des activités d'innovation (la conception des nouveaux produits) aux activités de recherche et technologie (sur quoi les chercheurs peuvent-ils chercher et quelles technologies sont acceptables ou pas – cf. les débats actuels sur RFID et vie privée).

Nous ne poursuivrons pas ce thème de la gouvernance des nano sciences et technologies qui mobilise de nombreux collègues. Associés aux complémentarités institutionnelles, nous constatons déjà deux premières sources importantes de spécificité. Dans les deux sections qui suivent, nous voudrions insister sur deux autres spécificités, liées au rôle des grandes firmes, d'une part, et aux phénomènes d'agglomération, d'autre part.

3. Une domination des grandes entreprises mondiales

Nombre d'acteurs, lorsqu'ils envisagent l'émergence des nanotechnologies, se réfèrent à celle des biotechnologies caractérisée par la création de start-ups. Universitaires et start-ups ont permis l'exploration des multiples options scientifiques et technologiques qui se présentaient. Darby et Zucker (2003) anticipent un modèle de développement des nanotechnologies similaire à celui des biotechnologies avec la présence de scientifiques renommés, des liens importants entre université et industrie, une organisation efficiente du transfert de technologie, des créations d'entreprises fondées sur la recherche et du capital risque pour financer les phases initiales de développement. La configuration industrielle de la microélectronique est différente, les acteurs du secteur s'accordent par le biais d'une « roadmap » partagée à laquelle participe un millier d'experts, sur les caractéristiques fonctionnelles et les standards qui vont organiser les cinq générations à venir et, de ce fait, la structuration et la coordination des programmes de recherche (Delemarle, Larédo, 2008). Ce modèle, propre aux secteurs où

des investissements importants sont requis au départ, débouche sur la constitution de trajectoires technologiques partiellement irréversibles, avec une accumulation progressive de compétences et un rôle des start-ups centré sur des éléments spécifiques de la chaîne de la valeur.

Pour comprendre le développement économique des nanotechnologies, nous avons choisi de suivre le développement des entreprises. La première base constituée en 2005 (cf. encadré 1 pour la méthodologie) rassemble plus de 6000 firmes présentes dans les nanotechnologies entre 1992 et 2003. Une mise à jour de cette base est en cours. On compte aujourd'hui près de 11000 entreprises. La base 1992-2003 a été rapprochée de celle développée par le Ministère du commerce et de l'industrie (DTI) en Grande-Bretagne, qui recense les 1250 entreprises mondiales faisant les plus grosses dépenses de R&D⁴. Comme l'illustre le tableau 1, 15% des entreprises engagées dans des recherches en nanotechnologies en 2003 sont également recensées par le DTI. Cela signifie que plus de quatre firmes sur dix parmi celles qui dans le monde ont les dépenses de R&D les plus importantes sont directement engagées dans la R&D nanotechnologique. En outre, si l'on tient compte des affiliations capitalistiques (les firmes de notre base nano qui sont possédées par les firmes recensées par le DTI), ce pourcentage est quasiment des deux tiers (63%). Ces firmes sont présentes dans tous les secteurs dans des proportions aussi importantes dans l'automobile, les matériaux ou la chimie que dans les secteurs de haute technologie comme les biotechnologies ou la microélectronique (tableau 2) ce qui confirme le caractère générique des nanotechnologies.

Tableau 1 : Proportion des grandes entreprises (en termes de dépenses de R&D) engagées dans les nanotechnologies

⁴ http://www.innovation.gov.uk/rd_scoreboard/

Firmes de DTI 2004	Firmes 1992-2003	Firmes présentes dans les deux bases	%
1250	6164	524	41.9 %

Tableau 2 : Secteur des entreprises nanos

Zone géographique	Nombre de firmes	Secteur 1	%	Secteur 2	%	Secteur 3	%
Asie	187	Electronic & electrical equipment	18.7	Chemicals	16.6	Technology hardware & equipment	12.8
EU27 & associated countries	135	Pharmaceuticals & biotechnology	16.3	Chemicals	14.1	Automobiles & parts	11.2
US & Canada	200	Technology hardware & equipment	27.5	Pharmaceuticals & biotechnology	16.5	Chemicals	11.5
Other	2						
World	524	Technology hardware & equipment	16.8	Chemicals	13.8	Pharmaceuticals & biotechnology	13.4

Ces tableaux tendent à démontrer que les nanotechnologies seraient plus sources d'améliorations et de transformations dans des secteurs industriels existants que sources de nouvelles industries. Il s'agirait typiquement de ce qui est qualifié de technologie générique. Le mode de pénétration serait cependant différent de celui mis en avant par Pavitt (1984) : c'est moins par le biais d'équipements (comme les ordinateurs) que passerait leur effet diffusant que par leur insertion directe dans la conception des produits. Ces grandes entreprises (comme les *start-ups* issues des émergences précédentes) bénéficient ainsi de compétences accumulées qui peuvent être mobilisées pour intégrer les nanotechnologies, redéployées ou adaptées. Ces entreprises sont capables de s'engager simultanément dans des processus de recherche de moyen et long terme et d'être présentes sur le marché. Elles ont ainsi la possibilité d'intégrer les composants issus des nanotechnologies au sein des produits existants.

Cette notion d'intégration entre apports nouveaux et technologies préexistantes dans les bases de connaissance des firmes est mise en exergue par les travaux d'Avenel et al. (2007). Mais ils montrent également des stratégies divergentes entre petites et grandes firmes. Alors que les grandes firmes organisent cette hybridation au niveau de leur portefeuille de brevets (chacun restant cantonné à une seule technologie), les PME sont amenées à intégrer cette hybridation au niveau du brevet même. Ainsi se dessinerait un partage de tâches dans la manière d'insérer

les nanotechnologies dans le monde économique : aux grandes firmes le soin d'internaliser leurs apports dans les marchés existants, sous une forme plutôt cumulative - voire « révolutionnaire » au sens de Abernathy et Clark (1985), les changements radicaux ne concernant que la manière de produire les produits mais pas leurs liens aux usagers - ; aux petites firmes celui d'explorer d'autres agencements et d'éventuellement initier de nouveaux marchés de niche à destination de clients industriels (B to B) ou de l'utilisateur final (B to C).

On retrouverait alors un parallèle sur l'analyse d'ensemble des relations entre biotechnologies et pharmacie (Rothaermel, 2007), où les *start-ups* sont là pour démontrer la valeur d'une option avant de se faire racheter par les majors mondiaux de la pharmacie. Ces développements conduisent à faire l'hypothèse d'une dynamique très différente des deux précédentes vagues. Comme dans les biotechnologies, les petites firmes sont là pour explorer les marchés de rupture, mais ceci reste aujourd'hui un mouvement marginal, la plupart des *start-ups* se situant plutôt dans un marché de prestations pour les activités de R&D des grandes firmes (Mustar, 2006). Comme la microélectronique, les grandes firmes jouent un rôle central, mais ces dernières sont différentes dans la mesure où elles s'adressent directement aux utilisateurs finaux (et ne se concentrent pas sur les marchés intermédiaires, *business to business*). Cela explique leur bien plus grand nombre et la variété des activités industrielles concernées.

4. Une concentration très forte et inédite des capacités de recherche

Nombreuses grandes firmes, multiples secteurs d'activité concernés, trois grands domaines encore peu interpénétrés (chimie et matériaux, physique et électronique, biotechnologies), très forte croissance : tout est rassemblé pour promouvoir une large dispersion des activités et des compétences entre pays et entre localisations dans ces pays. Tous ces éléments conduisent logiquement à penser que les nano sciences participent complètement d'un mouvement de globalisation et de répartition. Globalisation parce qu'entraînant de nombreux nouveaux pays, répartition parce que les compétences se trouveraient largement déployées dans chacun des pays concernés vue l'ampleur des domaines scientifiques et des acteurs engagés. Tel n'est pas le cas, comme vont s'efforcer de le démontrer les lignes qui suivent.

Encadré 2 géolocalisation et construction des clusters

La géolocalisation utilise les adresses associées à chaque article présent dans la base de données. Nous avons développé un programme qui s'appuie sur l'identification des villes et des Etats (pour les pays fédéraux ainsi que les préfectures pour le Japon) pour attribuer à chaque adresse (par l'intermédiaire du moteur de géolocalisation de MapPoint Europe 2006) des coordonnées géographiques correspondantes au système géodésique WGS 84 (*World Geodetic System* de 1984). Le programme repère les structures identiques en fonction des adresses des pays (position de la ville, du code postal, ...) et isole les cas particuliers pour les traiter séparément.

La deuxième étape a consisté à identifier les villes rassemblant 1000 adresses de publications et plus. Elles ont servi à bâtir les clusters selon une règle strictement géographique : 50 km de rayon autour de la ville centre dans l'ensemble du monde sauf la Corée du Sud, Taiwan et le Japon, pour lesquels la distance prise en compte est de 30 km. Lorsqu'il y a recouvrement des adresses entre deux clusters, un seuil a été retenu pour les fusionner (il est de 20% des adresses du plus petit cluster). Pour ces clusters regroupés, le barycentre a été recalculé. Cette solution, facultative aux Etats-Unis qui ont une tradition de travail statistique par aires métropolitaines (correspondant à des bassins de population), s'est avérée indispensable pour suivre de façon similaire les développements en Asie et en Europe.

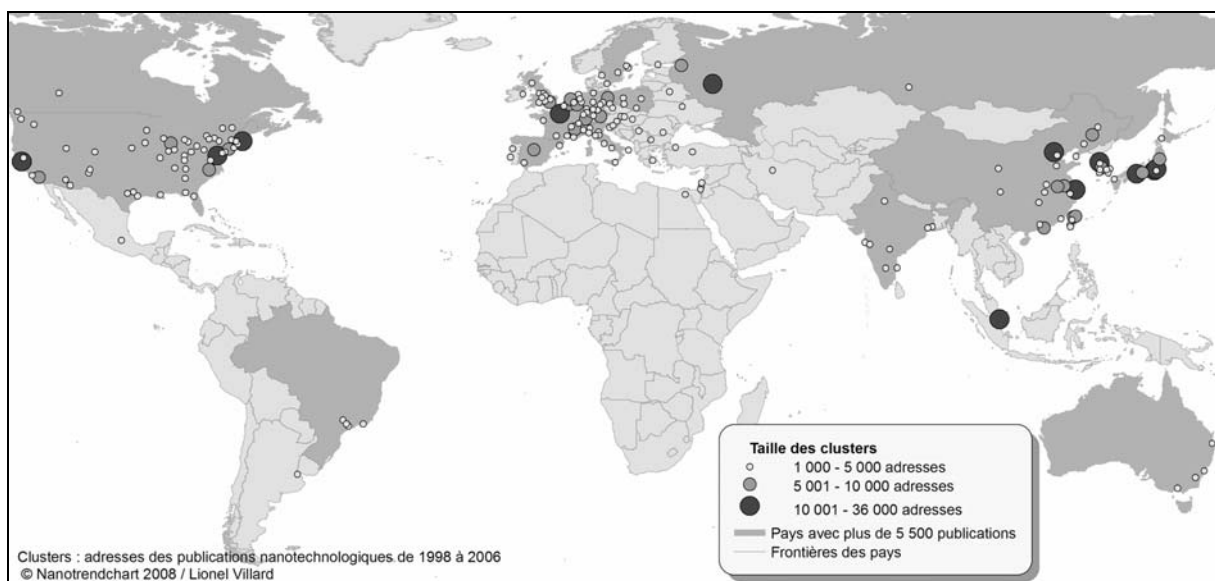
Ainsi, pour l'ensemble des publications scientifiques, nous géolocalisons 93% des adresses correspondantes aux articles. 73% de ces adresses sont concentrées dans 200 clusters géographiques différents. Cette méthode a été appliquée de manière identique aux brevets nanotechnologiques de la base de données PATSTAT, en réutilisant les centres des clusters précédemment établis.

L'encadré 2 explicite la manière dont nous avons géolocalisé les données et construit les clusters. Ils nous permettent, sans doute pour la première fois dans des travaux scientométriques de cette ampleur (plus de 500 000 articles), d'avoir une vision géographique exhaustive de la production scientifique mondiale.

Sur la décennie (1998-2006), la concentration géographique reste très forte (5 pays représentent les 2/3 des articles produits). Malgré tout, 22 pays franchissent la barre de 1% des publications (5500 sur la période). La triade continue à jouer un rôle central avec l'ensemble Etats-Unis-Canada, le Japon et l'Europe dont 10 pays, Israël et Suisse inclus, pèsent plus de 1% individuellement. Elle est complétée, comme c'est traditionnellement, le cas par l'Australie. Cependant, dans la foulée des technologies de l'information, on retrouve également les « tigres » asiatiques (Corée du Sud, Taiwan et Singapour). Et surtout cette carte est complétée par la présence des BRIC (avec une forte présence chinoise devenue la troisième nation mondiale en importance). En outre, dès qu'on analyse les taux de croissance,

la répartition spatiale évolue fortement : les fortes croissances sont concentrées dans la nouvelle Asie et ne semble pas se limiter à un simple effet de rattrapage (seul le Japon, second pays en importance, a une croissance relative faible). La carte des capacités productives mondiales s'étend et change à la fois : la triade évolue avec une Asie élargie (dont la Chine est devenue le premier producteur scientifique) et renforcée (en devenant le premier pôle productif de la triade). Les autres BRIC (respectivement Russie, Inde et Brésil), bien que présents, demeurent des zones secondaires de production.

Carte 1 : La production scientifique des nanotechnologies dans le monde



Comment s'organisent ces anciens et nouveaux espaces de production ? Un des résultats probablement les plus forts tient dans l'extrême concentration de la production scientifique dans 200 « nanodistricts » qui représentent les trois quarts des adresses et plus de 80% des publications. Shapira et al. (2008) arrivent aux mêmes conclusions pour les seuls Etats-Unis. Leur analyse montre une forte « dépendance du sentier » avec des districts déjà visibles lors des vagues précédentes (mais à part deux exceptions, les biotechnologies ne semblent pas jouer un rôle moteur) ou des districts accolés à une institution (université ou laboratoire national) qui joue un rôle d'« ancre » dans l'engagement du district dans les nanotechnologies (Agrawal, Cockburn, 2003).

Nos travaux tendent à fortement nuancer ces analyses pour l'ensemble du monde pour plusieurs raisons : premièrement, ces 200 clusters proposent une autre géographie. En particulier, ils réintroduisent des pays absents de la carte des nations, principalement les ex-pays de l'Est ou les ex-Etats de l'URSS (avec 3 clusters polonais, Sofia, Minsk, Ljubljana, Brastislava, Kiev, Bucarest, Prague, Budapest et Belgrade). Ils permettent de voir quelques autres points émerger en Amérique latine (Mexico et Buenos Aires) comme dans le large pourtour méditerranéen (avec Istanbul et Ankara, Le Caire et Téhéran). Ainsi le monde des nanosciences est certes très concentré dans un nombre limité de districts, mais il est également plus diversifié (quant au nombre de pays concernés par les développements en cours et qui ne sont traditionnellement pas associés aux vagues précédentes).

Deuxièmement, on observe clairement une relation forte entre croissance et zones d'implantation des clusters. Entre 1998 et 2005, la croissance moyenne est de 11% par an pour les 200 clusters. Elle est portée par un quart des clusters. Parmi ces 50 clusters, 33 sont asiatiques (18 des 19 districts chinois, Singapour, les 5 districts de Taiwan mais seulement 3 des 8 petits districts indiens et 1 seul des huit clusters japonais), 2 brésiliens et 3 du large pourtour méditerranéen (tous de taille modeste). Les 5 districts américains à forte croissance sont de petite taille, comme les 5 Européens qui, de plus, sont localisés dans les « marges » Sud et Est de l'Europe. On ne peut donc pas parler de phénomène cumulatif avec un avantage pour les implantations déjà centrales lors des révolutions scientifiques précédentes.

Les taux de croissance ne suffisent cependant pas à caractériser la situation mondiale. Les positions initiales comptent également. Ainsi 12 clusters comptent plus de 10 000 adresses associées aux publications sur la période 1998-2006 (la base compte en moyenne deux adresses différentes par publication). Ces 12 clusters sont partie prenante de 44% des articles publiés. La liste entre 1998 et 2005 ne compte que 2 changements avec l'entrée dans ce « top 12 » de Shanghai et Singapour, les dix autres étant déjà les plus forts publiants en 1998 (Tokyo, Kyoto, Tsukuba, Beijing et Séoul pour l'Asie, San Francisco, Boston et Washington pour les USA, Paris et Moscou). Ils remplacent deux districts européens : Berlin et Londres, qui se retrouvent respectivement 21^{ème} et 28^{ème} en 2005. De même, toujours en 2005, Moscou n'est plus que 16^{ème} et remplacé dans les 12 premiers par un cluster taïwanais. Ces deux

résultats, la localisation continentale et la taille initiale, expliquent plus de 60% de la croissance des clusters dans le modèle économétrique développé par Mangematin et Rieu (2008) (tableau 3).

Tableau 3 – 15 clusters les plus importants

Pays	Ville Centre	Nb Adresses	Taux de variation 1998-2006 (%)
Japon	Tokyo	35363	69
Chine	Beijing	26492	410
Japon	Kyoto	22285	74
Corée du Sud	Seoul	20343	263
France	Paris	16385	55
USA	Berkeley	16176	100
Japon	Tsukuba	14003	234
USA	Washington	13292	102
Chine	Shanghai	12347	519
USA	Boston	11650	124
Russie	Moscou	10368	60
Singapour	Singapour	10256	423
Allemagne	Berlin	9065	57
Taiwan	Hsinchu	9057	251
Japon	Nagoya	8575	112

Un dernier aspect nous semble déterminant. Il concerne les interactions entre clusters. Ces 200 clusters rassemblent, rappelons le, un million d'adresses pour plus de 450000 articles publiés sur les 9 années d'étude prises en compte. Environ 60% de ces adresses sont limitées à un seul cluster. Il y a donc plus de 40% d'adresses qui correspondent à des collaborations scientifiques entre clusters. En moyenne, un cluster entretient des coopérations avec deux tiers des autres clusters. Ces collaborations restent cependant limitées : en moyenne 2 articles par an et par relation bilatérale. Malgré tout, 16% de ces collaborations pèsent 1% et plus de la production d'un des deux clusters collaborateurs. Nous avons cherché à analyser le cœur de ces relations en prenant comme seuil l'existence de 100 collaborations et plus pendant la période étudiée. Ces « relations fortes » représentent 2,5% des 26 000 relations inter-clusters et 37% du nombre total de collaborations inter-clusters.

L'analyse de ces 640 relations fortes fournit une carte surprenante du monde. On retrouve bien les 3 grands blocs, mais tant les interactions internes qui les structurent que la manière

dont ils sont liés les uns aux autres donnent une image du monde peu commune. Analysons-les tour à tour avant de regarder les liens intercontinentaux.

L'Amérique du nord compte 52 clusters (47 aux Etats-Unis et 5 au Canada qui sont de petite taille et peu connectés entre eux et avec le reste du monde). 5 grands clusters (Berkeley, Washington, Boston, Los Angeles et New York) sont fortement liés entre eux (11 relations) et structurent l'ensemble des relations fortes existantes entre clusters nord-américains (50 des 53 autres relations observées). Ils sont les seuls à entretenir des liens intercontinentaux : 8 relations fortes avec l'Europe et 10 avec l'Asie.

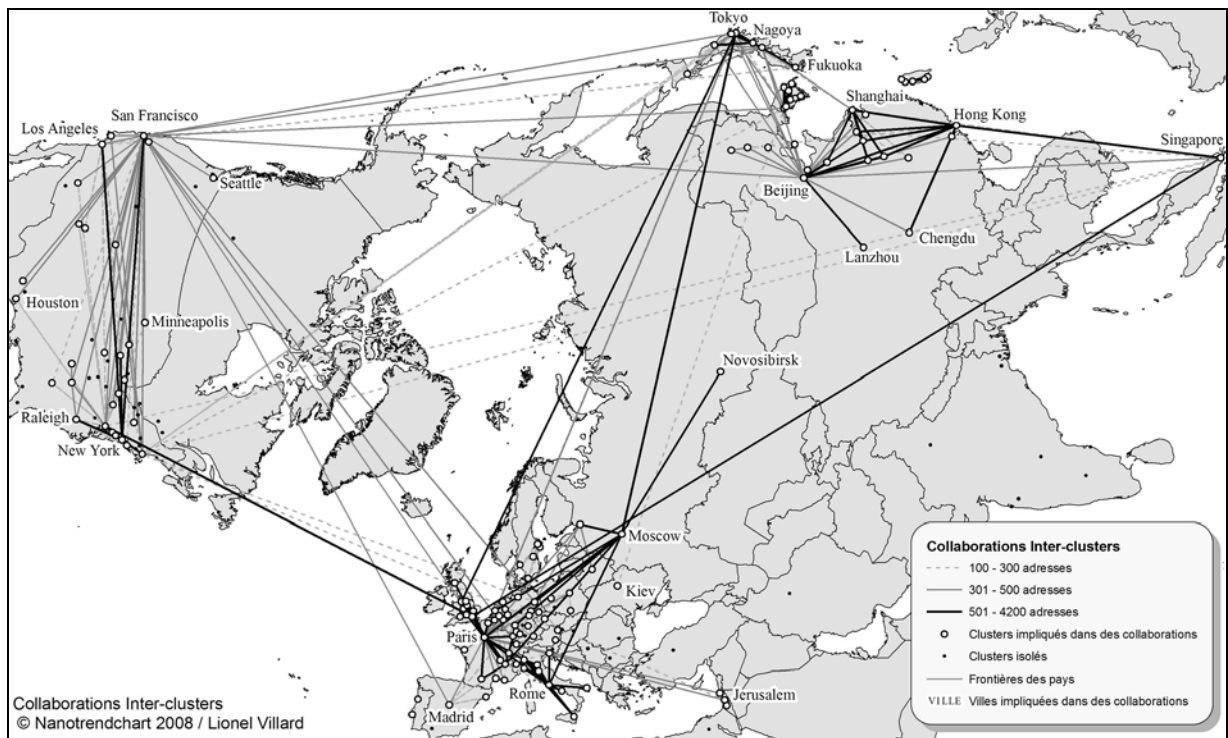
L'Asie a une structure nationale affirmée. Les 8 clusters indiens, tous de « petite » taille, restent à l'écart des principaux flux d'échange. Les clusters taiwanais sont très fortement interconnectés (17 relations fortes entre les 5 clusters) mais, comme leurs homologues indiens, ils ne s'insèrent pas dans les grands flux asiatiques et mondiaux. La situation est toute autre pour le Japon (8 clusters dont 3 centraux : Tokyo, Kyoto et Tsukuba), la Chine (19 clusters dont 3 centraux : Beijing, Shanghai et Honk Kong), La Corée du Sud (8 clusters dont 2 centraux : Séoul et Taejon) et la ville-pays de Singapour. Ces 35 clusters génèrent quelque 68 liens intra-pays, soit quasiment 2 liens forts par cluster en moyenne (contre 1,2 aux Etats-Unis). Mais à cela s'ajoutent des liens intra-asiatiques significatifs (14 relations fortes) et des liens avec les 2 autres ensembles (15 relations). Ces liens sont tirés par les relations fortes entre 8 des 9 clusters centraux des 4 pays (ils sont à la source des 14 relations intra-asiatiques dont 11 se passent entre eux, et de 13 des 15 relations intercontinentales).

L'Europe, définie comme les pays membres de l'Union européenne et les pays associés pour la recherche (dont le principal ici est Israël), compte un nombre plus important de clusters (80), même si ces derniers ont une taille moyenne équivalente à celle de leurs homologues américains (3200 contre 3300 adresses, mais 5700 en moyenne pour leurs homologues asiatiques). Ce qui caractérise l'Europe tient moins à ses relations intra-nationales fortes (95) qu'à ses liens intra-européens : 40 relations fortes entre 27 clusters. On est loin d'une image fragmentée de l'Europe qui apparaît comme un espace nettement plus interconnecté que les Etats-Unis : 1,7 liens forts en moyenne par cluster contre à peine 1,2 aux Etats-Unis.

Cette interaction plus dense est, comme les deux autres espaces, fortement polarisée. Quelques clusters concentrent le cœur des relations nationales et intra-européennes : deux clusters français – Paris et Grenoble – sont les deux pôles inter-connecteurs principaux cristallisant les 12 relations intra-françaises et 24 des 40 relations intereuropéennes. Zurich, Louvain, Berlin et Julich sont les seules autres villes à entretenir plus de 5 relations inter-européennes (y compris entre elles), alors que Rome, Londres, Manchester ou Munich sont des *hubs* nationaux.

Cette intégration européenne va de pair avec une ouverture internationale significative (22 relations fortes non européennes). Deux particularités européennes méritent l'attention. D'une part, les relations avec la Russie (Moscou et Saint Petersburg, 10 relations pour 8 clusters européens) sont plus importantes que celles avec les clusters asiatiques ou américains. D'autre part, les villes centrales dans l'intégration européenne (dont les 2 principales Paris et Berlin) jouent un rôle concentrateur moindre : elles ont complétées par des villes qui jouent un rôle central dans leur pays (comme Londres, Jérusalem, Madrid, Delft ou Rome), mais aussi par des clusters plus petits qui ont développé des relations bilatérales spécifiques (Gothenburg avec Novossibirsk, Prague avec Tsukuba, Mainz avec Moscou, Halle avec Saint Petersburg).

Carte 2 : Réseau des principales collaborations entre les clusters



Ainsi se dégage un quatrième trait : les 200 clusters dessinent 3 mondes fortement intra-connectés : les Etats-Unis, l'Asie et l'Europe. Les connexions au sein de chacun de ces mondes sont très différentes. Si tous sont polarisés par un nombre limité de clusters cœur, ce qui frappe tient à la faible densité intra-américaine comparée aux fortes densités intra-nationales en Asie (Chine, Japon, Corée et Taiwan, les 3 premiers étant également interconnectés entre eux et avec Singapour par le biais de leurs clusters cœur) et à la forte densité européenne, où les clusters sont de taille similaire à ceux que l'on trouve en Amérique mais nettement plus interconnectés au niveau global de l'Europe. On ne retrouve pas non plus la très forte hiérarchie américaine où 5 clusters structurent à la fois l'espace national et les liens avec le reste du monde. En Europe, les 6 clusters centraux ont quasiment les mêmes effets structurants que leurs homologues américains mais l'organisation des connexions intercontinentales élargit le spectre à une dizaine d'autres clusters.

Cette carte du monde des nano sciences est donc à la fois beaucoup plus plate par le nombre de pays impliqués mais elle est marquée par un nombre limité de collines voire de pics qui concentrent la quasi-totalité de la production. Ces 200 nanodistricts dessinent un monde

fortement inter-connecté dont la structure, spécifique à chaque continent, s'organise autour d'un noyau limité de grands clusters. Ni les nombreux nouveaux clusters de pays absents de révolutions précédentes, ni la structure des échanges ne reproduisent, à l'exception des Etats-Unis, les structures prévalentes lors des deux révolutions précédentes associées aux biotechnologies et aux technologies de l'information.

5. Conclusion

La forte croissance des nanosciences et technologies, l'ampleur des complémentarités institutionnelles, la forte présence de grandes firmes actuelles, l'implication de nombreux secteurs d'activité, la très forte concentration sur 200 clusters et la géographie mondiale renouvelée qu'ils proposent (sans compter les nouvelles modalités de construction des infrastructures de marché associées à l'ampleur des débats publics très en amont des développements industriels) permettent une première conclusion : cette nouvelle vague technologique s'annonce très différente des précédentes, alors même qu'on est bien en peine de dessiner les modalités que prendront à la fois la généralisation de leur usage et les « modèles industriels » (*business models*) correspondants. Un premier horizon temporel semble être celui de l'insertion des nano S&T dans des marchés et produits existants pour en améliorer des aspects spécifiques, d'où l'importance des investissements effectués par les grandes entreprises leaders mondiaux dans leurs marchés de masse respectifs. Un second horizon temporel, aujourd'hui difficile à spécifier, postule des formes renouvelées d'intégration de savoirs aujourd'hui distincts (la fameuse « convergence des NBIC ») et s'appuierait sur des *start-ups* dont le rôle serait de démontrer l'intérêt de ces assemblages inédits, voire d'initier des nouveaux marchés de niche.

Quoi qu'il en soit, ces caractéristiques nous semblent porteuses de deux interrogations sur les espaces de déploiement des activités et sur les politiques qui les suscitent, les accompagnent et les encadrent. Les Etats-Unis offrent un modèle national stable largement orienté dans ses impulsions par l'importance des missions publiques (la défense, la santé, l'énergie, la sécurité et l'environnement). L'Asie, en très forte croissance, demeure pour l'instant inscrite dans les trajectoires nationales de ses membres et les positionnements reflètent une dépendance par rapport au passé à la fois disciplinaire et sectoriel. L'Europe présente un visage très différent

avec à la fois une répartition spatiale très forte de ses clusters et des sources d'impulsion sensiblement différentes (l'absence d'Oxford et Cambridge comme clusters cœur illustre cette transformation). Elle se caractérise également par l'importance des interactions intra-européennes qui pose une question centrale aux politiques : qu'est-ce qu'une politique nationale quand elle s'adresse à un nombre limité de clusters, dont une bonne part de la dynamique tient dans des liens extranationaux mais intra-européens ? Faut-il remplacer nos programmes nationaux (ou à tout le moins les compléter) par des politiques de « pôles » et porter au niveau européen le soin des orientations et des incitations par projets ? Est-ce le sens à donner au nouveau mot-clé à la mode dans les cénacles bruxellois : la programmation conjointe ? Et si la pénétration des nanos est multisectorielle, faut-il tout concentrer dans un programme nano, ou faut-il compléter cette approche par autant de programmes finalisés nano qu'il y a de secteurs stratégiques concernés (sur le modèle américain) : serait-ce alors le sens à donner aux « grands challenges » que propose le récent rapport sur les justifications de l'ERA (Georghiou et al., 2008) ? On mesure ainsi mieux l'ampleur des transformations proposées par cette nouvelle vague scientifique et technologique à l'internationalisation des systèmes nationaux de recherche.

Bibliographie

- Abernathy W.J., Utterback J. (1978), « Patterns of Industrial Innovation », *Technology Review*, vol. 80, pp. 41-47.
- Abernathy W.J. & K. Clark (1985), « Innovation: Mapping the Winds of Creative Destruction », *Research Policy*, vol. 14, pp. 3-22.
- Agrawal A., Cockburn I. (2003), « The Anchor Tenant Hypothesis: Exploring the Role of Large, Local, R&D-intensive Firms in Regional Innovation Systems », *International Journal of Industrial Organization*, vol. 21, pp. 1227-1253.
- Audretsch D.B. (2001), « The Role of Small Firms in US Biotechnology Clusters », *Small Business Economics*, vol. 17, no 1, pp. 3-15.
- Avenel E., Favier A.V., Ma S., Mangematin V., Rieu C. (2007), « Diversification and Hybridization in Firm Knowledge Bases in Nanotechnologies », *Research Policy*, vol. 36, no 6, pp. 864-871.
- Birraux C., Revol H. (2003), *Microélectronique et nanotechnologies : une chance à saisir*,

Actes Du Colloque, Sénat, Paris.

Bonaccorsi A., Thoma G. (2007), « Institutional Complementarity and Intensive Performance in Nano science and Technology », *Research Policy*, vol. 36, no 6, pp. 813-831.

Bonaccorsi A. (2008), "Search Regimes and the Industrial Dynamics of Science", *Minerva*, vol. 46, pp. 285-315.

Darby M., Zucker L. (2003), « Grilichesian Breakthroughs: Inventions of Methods of Inventing and Firms Entry in Nanotechnology », Working Paper 9825, NBER, Washington.

Delemarle A., Larédo P. (2008), « Breakthrough Innovation and the Shaping of New Markets: the Role of Community of Practice » in Amin A., Roberts J. (eds), *Organising for Creativity: Community, Economy and Space*, Oxford, Oxford University Press, pp. 178-200.

Dupuy J.P., Roure F. (2004), *Les nanotechnologies : éthique et prospective industrielle*, Conseil Général des Mines, Paris.

Georghiou L. et al. (2008), « Challenging Europe's Research: Rationales for the ERA », European Commission, EUR 23326, Luxembourg, OPOCE.

Hill C.W.L., Rothaermel F.T. (2003), « The Performance of Incumbent Firms in the Face of Radical Technological Innovation », *Academy of Management Review*, vol. 28, no 2, pp. 257-274.

Kahane B. (2008), « Nar-action, vagues technologiques et nanotechnologies », *Alliage*, vol. 62, pp. 58-66.

Kahane B., Mangematin V. (2007), « Nanotechnologies : un modèle de développement économique à inventer », *Technology Review France*, vol. 1, no 1, pp. 18-25.

Kuhn T. (1970), *La Structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion.

Mangematin V. et Rieu C. (2008), « The Determinants of the Science-based Cluster Growth », mimeo (soumis pour publication), Grenoble.

Mogoutov A., Kahane B. (2007), « Data Search Strategy for Science and Technology Emergence: A Scalable and Evolutionary Query for Nanotechnology Tracking », *Research Policy*, vol. 36, no 6, pp. 893-903.

Mustar P. et al. (2006), « Conceptualising the Heterogeneity of Research-based Spin-offs: A Multi-dimensional Taxonomy », *Research Policy*, vol. 35, pp. 289-308.

Nordmann A. (2004), « Converging Technologies: Shaping the Future of the European Societies », HLEG Foresighting the New Technology Wave, European Commission,

Bruxelles.

Pautrat J.L. (2002), *Demain le nanomonde : voyage au coeur du minuscule*, Paris, Fayard.

Rafols I., Meyer M., Leydesdorff L. (2008), « Capturing Interdisciplinarity Through the Diversity and Network Coherence in Nanobioscience », Prime conference on S&T indicators, Oslo, May 28-30.

Robinson D., Rip A., Mangematin V. (2007), « Technological Agglomeration and the Emergence of Clusters and Networks in Nanotechnology », *Research Policy*, vol. 36, no 6, pp. 871-879.

Rothaermel F.T., Thursby M. (2007), « The Nanotech versus the Biotech Revolution: Sources of Productivity in Incumbent Firm Research », *Research Policy*, vol. 36, no 6, 832-849

Shea C.M. (2005), « Future Management Research Directions in Nanotechnology: A Case Study », *Journal of Engineering and Technology Management*, vol. 22, pp. 185-200.

Schummer, J. (2004), « Multidisciplinarity, Interdisciplinarity, and Patterns of Research Collaboration in Nanoscience and Nanotechnology », *Scientometrics*, vol. 59, pp. 425-465

Zucker L.G., Darby M., Furner J., Liu R.C., Ma H. (2007), « Minerva Unbound: Knowledge Stocks, Knowledge Flows and New Knowledge Production », *Research Policy*, vol. 36, no 6, pp. 850-863.

Zucker L.G., Darby M.R., Armstrong J. (1998), « Geographically-Localized Knowledge : Spillovers or Markets? », *Economic Inquiry*, vol. 36, no 1, pp. 65-86.