

Émergence des nanotechnologies : quels modèles ?

Vincent Mangematin^Λ

Les nouvelles technologies émergentes, comme la microélectronique des années 70, les biotechnologies des années 85 ou les nanotechnologies des années 2000, 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) (voir aussi le site de Pièces et main-d'œuvre – <http://pmo.erreur404.org/>). Toutes les nouvelles vagues *high-tech* s'inscrivent à la fois dans la continuité des inventions précédentes et en rupture par rapport à l'existant. Le degré de rupture varie suivant les technologies. Les biotechnologies ont profondément transformé les sciences de la vie, rendant caduques les méthodes de recherche scientifique et de production, bouleversant les rapports de forces entre les acteurs, grands groupes, recherche académique et *start-up*. La vague la plus récente, celle des nanotechnologies, s'inscrit dans la continuité des phases *high-tech* précédentes, transformant les processus de production scientifiques et techniques : la microélectronique devient nanoélectronique, les biotechnologies se transforment en nanobiotechnologies et de nouveaux horizons s'ouvrent en chimie. Au-delà des transformations au sein de chaque discipline, les experts arguent que la convergence entre les disciplines constitue la promesse scientifique et technique la plus forte.

Les stratégies des acteurs et les politiques publiques se fondent sur les caractéristiques similaires de chaque phase d'émergence : fort taux de croissance des connaissances scientifiques, remise en cause des positions existantes des entreprises, émergence de nouveaux liens entre les acteurs, qu'ils soient universités, entreprises, pouvoirs publics ou la société de manière plus générale (première partie). Cependant, contrairement aux biotechnologies qui ont fortement influencé l'innovation dans la biologie, les nanotechnologies ont un impact sur plusieurs domaines scientifiques et technologiques. Quelle est l'ampleur des transformations ? (deuxième partie). Lors de la phase d'émergence, l'investissement dans les nouvelles technologies repose sur un double pari : scientifique et technique tout d'abord, en espérant que les promesses

des nouvelles technologies donneront lieu à de nombreux développements ultérieurs ; économique 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. Quelles sont les modalités du développement économique ? Les nanotechnologies empruntent-elles une voie similaire aux biotechnologies, fondée sur la création de *start-up* valorisant les découvertes scientifiques, ou plutôt à la micro-électronique, où l'engagement des grands groupes industriels est déterminant ? (troisième partie). La conclusion discute les politiques publiques de soutien aux nanotechnologies.

1. Les nanotechnologies, des traits communs avec les autres révolutions scientifiques

Au-delà du caractère idiosyncratique de chacune des révolutions scientifiques, Bonaccorsi (Bonaccorsi, 2002) définit les caractéristiques des révolutions scientifiques et techniques par trois composantes : le taux de croissance, le degré de diversité et le niveau de complémentarité. 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, l'expérimentation, est requise~~ 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 a été aussi un des enjeux pour les 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 2000. L'invention par IBM des microscopes à effet tunnel (STM) et du microscope à Force Atomique (AFM), qui constituent de puissants outils pour explorer la matière à l'échelle nanométrique, marque ainsi le point de départ du développement industriel des nanotechnologies. Il y a trente ans, la biotechnologie émergeait elle aussi suite à la mise au point de nouveaux outils – les anticorps mono-

clonaux et la PCR – qui permettaient une exploration systématique du vivant au niveau des gènes. Cependant, à l'inverse des biotechnologies qui puisent leurs origines dans la biologie et seulement marginalement dans la chimie et la physique, les nanotechnologies émergent suite à l'évolution convergente et simultanée de 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. Il façonne aussi de nouveaux ponts entre les disciplines, ouvrant de nouveaux horizons scientifiques, autour de deux grandes approches: *top-down* et *bottom-up*. Dans la poursuite de la loi de Moore¹ en microélectronique, les approches *top-down* prolongent le mouvement existant de réduction de la taille et d'augmentation de densité des circuits au sein des semi-conducteurs. L'accroissement des rendements est obtenu par la hausse du nombre de circuits intégrés par « wafer² » tandis que la puissance associée à chaque circuit intégré augmente elle aussi. Les approches *bottom-up* empruntent des procédés de fabrication et de manipulation, issus selon les cas de la physique, de la chimie et/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.

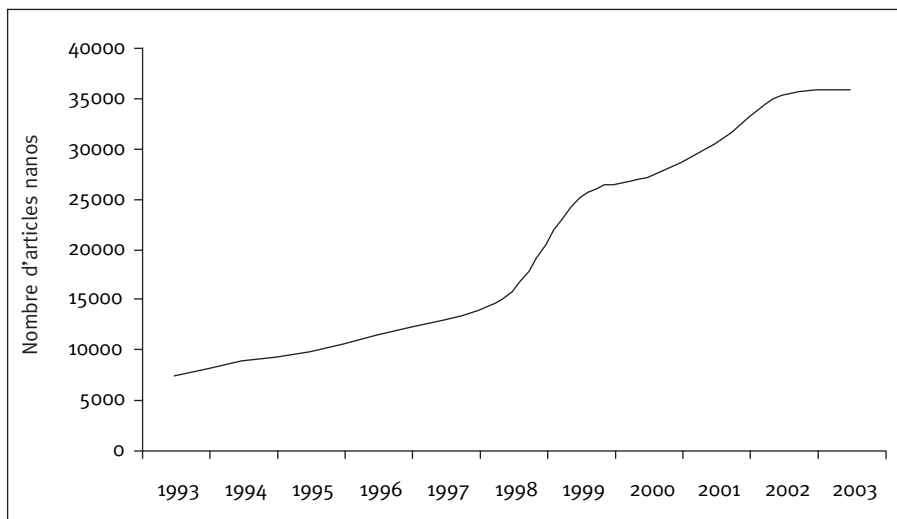
La figure 1 témoigne de l'explosion de la production scientifique relative aux nanotechnologies, qui croît de manière exponentielle depuis le milieu des années 90. Les nouveaux outils permettent d'améliorer les capacités de recherche existantes, d'augmenter la finesse et le grain de l'analyse, d'accroître 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

1. 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.
2. Les *wafers* sont les très fins disques de silice à la composition homogène et étroitement contrôlée sur lesquelles l'application de masques successifs permet d'organiser la gravure des circuits électroniques.

Droit et nanotechnologie

s'accompagne de nouvelles interrogations scientifiques et ouvre de nouvelles questions de recherche.

Figure 1: Evolution du nombre d'articles



Source: www.nanotrendchart.org

Encadré sur les données

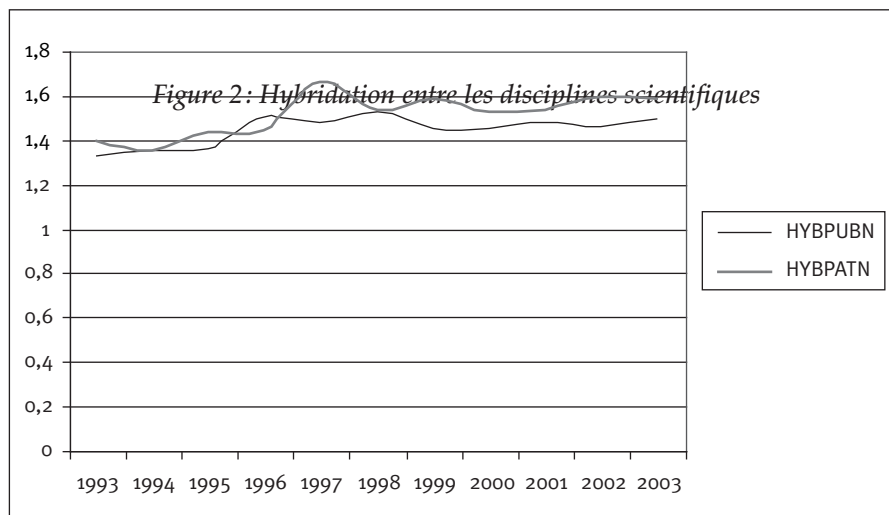
Afin de décrire le développement des nanotechnologies, nous avons construit une base de données portant sur les publications, les brevets et les entreprises impliquées dans les nanotechnologies au niveau mondial. Nous avons utilisé l'équation de recherche publiée dans *Research Policy* (Mogoutov *et al.*, 2007) pour identifier les publications du web of science relatives aux nanotechnologies entre 1992 et 2005. De la même manière, nous avons extrait les brevets relatifs aux nanotechnologies de la base PATSTAT. Enfin, dans la mesure où les classifications établies ignoraient jusqu'à récemment les nanotechnologies en tant que domaine, l'identification des firmes de nanotechnologie et la description de leurs bases de connaissance dans ce domaine nécessitent une démarche spécifique. 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 (Khun, 1970), la recherche explore une multitude d'hypothèses qui sont 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 recherche principales, dispose de méthodes similaires et publie dans un noyau 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 identifié.

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 significatives 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. La figure 2 présente l'évolution de la convergence dans des champs scientifiques pour les publications et les brevets.

Les indices d'hybridation des champs scientifiques dans les nanotechnologies HYBPUBN et des brevets HYBPATN témoignent d'une relative stabilité du degré d'hybridation, chacune des disciplines ou technologies restant relativement indépendante. On ne constate pas ou pas encore de convergence ni dans la recherche scientifique ni dans les technologies. En revanche, les nanotechnologies sont intégrées dans certains produits ou dans les processus de production.

Droit et nanotechnologie



Source : www.nanotrendchart.org

Le niveau de complémentarité recouvre les liens et les interdépendances entre les ressources humaines, les disciplines scientifiques, les équipements matériels qui sont mobilisées pour la recherche et l'innovation, la production scientifique. Ces complémentarités reposent non seulement sur les hommes et sur les infrastructures expérimentales spécialisées mais aussi sur les institutions qui soutiennent la recherche, la financent et encouragent les complémentarités. La dynamique des nanotechnologies repose sur une croissance forte source de diversité et de fortes complémentarités avec des disciplines scientifiques connexes. Lorsque les sciences sont convergentes, la dynamique repose sur de grands objets comme les réacteurs nucléaires expérimentaux. La coordination entre les acteurs se noue autour de ces instruments qui « localisent » les développements scientifiques et cristallisent les investissements de l'ensemble des institutions (pouvoirs publics nationaux ou régionaux, instituts de recherche, universités et écoles). À l'inverse, compte tenu de la très forte complémentarité requise par la phase d'exploration, les sciences qui présentent un fort degré de divergence reposent sur la mise à disposition de plates-formes technologiques diversifiées. Alors que la présence de très grands équipements localise les développements scientifiques au cœur d'une zone géographique prédéterminée, et que cette dynamique est renforcée par des programmes nationaux, la formation de pôles régionaux pour les domaines scientifiques divergents repose sur des initiatives *bottom-up* plus labiles. Les infrastructures de recherche sont de tailles plus réduites et peuvent être mises en réseau. Les acteurs s'agencent localement

autour des plates-formes technologiques, mais elles ne sont pas incontournables, comme l'étaient les grands instruments. C'est le cas des biotechnologies qui se sont structurées autour de l'exploration de paradigmes en concurrence, à partir de la mise en réseau de compétences complémentaires (réseau de géopoles par exemple). Il est donc nécessaire de s'intéresser non pas seulement aux instruments et à leur localisation mais aussi à la mise en synergie et à la construction de l'espace scientifique qu'ils drainent ou catalysent.

La variable temporelle apparaît aussi comme centrale. Quand un secteur arrive à maturité, les relations entre les acteurs se structurent. Des *start-up* ont été créées et occupent une position sur le marché. Elles ont noué des relations avec les laboratoires universitaires, les entreprises, les banques, le capital-risque et les marchés. Elles ont établi un partenariat avec les pouvoirs publics. Le monde économique dans lequel se développent les nouvelles technologies est structuré, balisé.

Ainsi, si la création d'entreprise a été un vecteur privilégié du transfert de technologie durant la phase d'émergence où les positions restaient contestables et peu stabilisées, l'arrivée à maturité du secteur des biotechnologies doit inciter à la prudence : si un flot continu de création d'entreprises permet d'assurer la création de richesses, les barrières à l'entrée sont plus élevées que dans la phase antérieure et la tâche des nouveaux entrants sera plus difficile, notamment parce que les acteurs déjà installés bénéficient d'effets d'apprentissage et d'économies d'échelle. Il est donc aussi utile de conduire une réflexion sur les outils pertinents de l'intervention publique (et sur la légitimité de l'action publique dans certains cas) pour favoriser le développement du secteur. Il est enfin opportun de s'interroger sur l'effet que peut avoir un investissement public important (services liés aux plateformes technologiques) sur des segments de marchés solvables sur lesquels les PME tentent de s'implanter.

2. Des spécificités importantes

Ces trois éléments caractérisent les situations d'émergence de nouvelles technologies, microélectronique, biotechnologies et nanotechnologies. Cependant, dans les biotechnologies actuelles comme dans les nanotechnologies, certains traits spécifiques apparaissent :

(1) **l'acceptabilité des innovations par le public et la société.** 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 part de la société. Les organisations non gouvernementales et les associations ont acquis une nouvelle légitimité auprès des pouvoirs publics qui ont organisé de nouvelles formes de concertations (débat public, consultations, etc.). À côté des débats parlementaires ont émergé des consultations directes qui influencent le débat public, les stratégies des entreprises et l'action des pouvoirs publics. Ces différents éléments ont été mis en place pour les biotechnologies et ils ont été mobilisés naturellement lors de l'introduction des nanotechnologies. De manière similaire, les entreprises intègrent dans leur stratégie les réticences potentielles de certains consommateurs.

(2) **Le recours à une instrumentation plus lourde**, plus coûteuse, autour de laquelle l'activité de recherche s'organise. Le domaine des biotechnologies connaît deux transformations simultanées : une intégration croissante de champs scientifiques auparavant distincts tels que la génomique, la biologie moléculaire, la biochimie et l'informatique ; le recours croissant à des moyens technologiques de plus en plus lourds et coûteux (les plateformes) pour explorer le génome, le protéome et le transcriptome qui nécessitent une mise en commun des moyens de recherche et des formes de gestion collective qui dépassent le cadre de la recherche publique (le cas des génopoles est emblématique). Face à ces transformations, la constitution de ces plateformes tend aujourd'hui à polariser les débats tant au sein de la communauté scientifique que pour les pouvoirs publics. En France, les pouvoirs publics ont initié une politique de rattrapage technologique en lançant le programme Génopole dans les biotechnologies. Conçu comme un réseau, il permet à chaque région de se spécialiser dans une dimension des biotechnologies et d'acquérir équipements et compétences afférentes.

Les nanotechnologies connaissent une évolution similaire, la disponibilité des plateformes constituant un élément essentiel du développement des nanotechnologies dans un lieu donné. Cependant, les perspectives de convergence renforcent le rôle de l'instrumentation. L'accès à des équipements complémentaires qui reposent sur des compétences disciplinaires hétérogènes est crucial pour permettre une hybridation des recherches et des technologies. Robinson et al. (Robinson *et al.*, 2007) décrivent la concentration de plateformes technologiques hétérogènes sous le terme de « technological agglomeration » pour rendre compte de cette évolution. Les nanotechnologies sont ainsi plus capitalistes que ne l'étaient les biotechnologies durant la phase d'émergence.

Enfin, les évolutions scientifiques s'accompagnent d'une mobilité thématique des chercheurs et ingénieurs qui produisent les nouvelles connais-

sances, en hybridant plusieurs domaines scientifiques. Les nanotechnologies ne reposent pas comme les biotechnologies sur une phase de destruction des compétences accumulées (Hill *et al.*, 2003) mais bien plutôt sur une évolution et une transformation des compétences existantes. Si certaines techniques remplacent celles qui existent et qui sont utilisées en routine, les nanotechnologies sont à l'heure actuelle intégrées dans les processus de production existants, ou directement incorporées comme composants. Les nanotechnologies requièrent ainsi l'acquisition de compétences par les personnels qui sont actuellement en place.

3. Une domination des grandes entreprises

Nombre d'acteurs, lorsqu'ils envisagent l'émergence des nanotechnologies, se réfèrent à celle des biotechnologies, caractérisée par la création de *start-up* qui ont assuré le lien entre le monde académique et les grandes entreprises. Universitaires et *start-up* ont permis l'exploration des multiples options scientifiques et technologiques qui se présentaient, les grandes entreprises intervenant ensuite pour faire alliance ou acquérir les PME détentrices des solutions qui semblaient les plus porteuses d'avenir. Ce modèle, où les acteurs développent en parallèle des options concurrentes, n'est viable que si les investissements de départ demeurent limités, compatibles avec la surface d'investissement et les prises de risque des investisseurs en capital et lorsque les compétences et les infrastructures mises en œuvre peuvent être redéployées. Darby et Zucker (Darby *et al.*, 2003) anticipent un modèle de développement des nanotechnologies similaire à celui des biotechnologies avec la présence de scientifiques renommés, des liens universités-industrie, une organisation efficiente du transfert de technologie, des créations d'entreprises fondées sur la recherche et le capital-risque pour financer les phases initiales de développement.

Les nanotechnologies sont aussi tirées par la nanoélectronique, dans le cadre d'une division du travail inspirée de la micro-électronique. La configuration industrielle est différente, les acteurs du secteur s'accordent sur une *roadmap* scientifique et technique et coordonnent leurs programmes de recherche sur les cinq à dix prochaines années. Ce modèle, propre aux secteurs où des investissements importants sont requis au démarrage, débouche sur la constitution de trajectoires technologiques partiellement irréversibles, avec

Droit et nanotechnologie

une accumulation progressive de compétences et un rôle des *start-up* plus limité que dans les biotechnologies.

Pour comprendre le développement économique des nanotechnologies, nous avons choisi de suivre le développement des entreprises. Une entreprise engagée dans les nanotechnologies est une firme dont l'un de ses employés a publié un article ou déposé un brevet en nanotechnologie entre 1995 et 2005. Nous avons aussi intégré les entreprises inventoriées dans la base de données nanoVIP. La base ainsi constituée rassemble 6 164 firmes.

La base a été rapprochée de celle développée par le ministère du commerce et de l'industrie (DTI) en Grande Bretagne, qui recense les 1 250 entreprises mondiales qui ont les dépenses de R & D les plus élevées (http://www.innovation.gov.uk/rd_scoreboard/). Comme l'illustre le tableau 1, 15 % des entreprises engagées dans des recherches en nanotechnologies font partie de celles recensées par le DTI. Ainsi 42 % (524/1 250) des 1 250 entreprises qui réalisent les dépenses de R & D les plus importantes sont directement engagées dans les nanotechnologies 784/1250 *i.e.* 63 % sont directement ou appartiennent à un groupe impliqué dans les nanotechnologies. Dans la plupart des secteurs, le nombre d'entreprises engagées dans la recherche est réduit, y compris dans les secteurs High Tech comme les biotechnologies. La proportion des firmes engagées dans la recherche en nanotechnologies témoigne de la nature générique des recherches en nanotechnologies.

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

Firmes de DTI 2006	Firmes nanotechnologies	Firmes du DTI en nanos	%
1250	6164	524	41.9 %

Comme il n'existe pas de nomenclature spécifique « nanotechnologies », les entreprises de nanotechnologie appartiennent aux secteurs d'activités desquels elles sont issues. Le tableau 2 montre que les entreprises qui sont actives en nanotechnologies sont dans les secteurs High Tech, *i.e.* qu'elles sont engagées dans la recherche. La répartition géographique suit la spécialisation des grandes zones géographiques; de la microélectronique et de l'informatique en Asie, tandis que l'informatique, les biotechnologies et la chimie sont prédominants aux États-Unis et au Canada et que l'Europe est plus spécialisée dans les secteurs biotechnologies et chimie d'une part, et l'introduction des nanotechnologies dans le secteur automobile d'autre part.

Tableau 2 : Secteur des entreprises nanos

Zone géographique	Nbre d'entreprises	Secteur 1	%	Secteur 2	%	Secteur 3	%
Asie	187	Electronic & electrical equipment	18.7	Chemicals	16.6	Technology hardware & equipment	12.8
EU25 & Candidate & 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

Les tableaux 1 et 2 appellent plusieurs commentaires : parmi les entreprises qui ont les plus fortes dépenses de R & D dans le monde, près de la moitié est aussi engagée dans les nanotechnologies. Elles bénéficient ainsi de compétences accumulées qui peuvent être mobilisées pour intégrer les nanotechnologies, redéployées ou adaptées. La recherche est organisée et structurée et les entreprises ont l'expérience des relations avec la recherche académique. Les dynamiques industrielles dans les nanotechnologies héritent ainsi des secteurs desquels elles sont issues, avec une forte implication des grandes entreprises dans la micro-électronique, la chimie et la présence notable de *start-up* qui ont grossi dans les biotechnologies.

Ces entreprises sont capables de s'engager simultanément dans des processus de recherche de moyen et long termes et d'être présentes sur le marché. Elles ont ainsi la possibilité d'intégrer les composants issus des nanotechnologies au sein des produits existants. À l'inverse, Avenel et al. (Avenel *et al.*, 2007) suggèrent que les nanotechnologies ne sont pas simplement la somme de ces disciplines (physique, ingénierie, biologie moléculaire et chimie), mais le résultat de leur convergence (Nordmann, 2004). Les stratégies des petites et des grandes firmes en matière de R & D de nanotechnologies se distinguent nettement par leur approche de cette convergence, les petites firmes exploitant beaucoup plus les possibilités d'hybridation créées par la convergence de nombreux champs techniques au sein des nanotechnologies.

Conclusion

L'ampleur des enjeux économiques a incité les pouvoirs publics nationaux et locaux à soutenir le développement des nanotechnologies. Ce soutien est d'autant plus nécessaire que les investissements sont importants et que des infrastructures sont requises pour mener à bien des recherches qui impliquent plusieurs disciplines. Les transferts de technologies recouvrent plusieurs dimensions, des relations universités/industries sur un projet de recherche à la création de start-up en passant par le partage d'équipements.

Les modes de développement des nanotechnologies restent incertains. Ils empruntent actuellement les trajectoires de la microélectronique et ceux des biotechnologies, mais dans chacun des cas la situation est différente des phases d'émergence de chacune de ces technologies. Des grandes entreprises sont directement engagées dans la recherche et des investissements importants sont réalisés pour créer des infrastructures. Les compétences sont développées dans la continuité des connaissances accumulées dans les périodes précédentes et les ruptures sont moins importantes que dans les biotechnologies où la situation était caractérisée par l'expression schumpéterienne de destruction créatrice.

Les politiques publiques sont conduites à différents niveaux: national pour la création d'entreprises (concours national de création d'entreprise), la labellisation des pôles de compétitivité, la création de conditions favorables à l'innovation; local pour la création de pôles de compétitivité, de parcs technologiques et d'infrastructures communes aux jeunes pousses. Il s'agit de localiser de manière durable la recherche et la production de produits ou techniques utilisant les nanotechnologies sur une zone géographique donnée. Une telle démarche peut inciter les entreprises à localiser leurs investissements sur ce territoire. Les premières applications (identifiées à partir des brevets notamment) des nanotechnologies demeurent à l'intérieur des frontières d'une discipline. À moyen terme, les rapprochements attendus entre différents domaines scientifiques, comme l'utilisation de la nanoélectronique dans les sciences du vivant, qui restent timides, constituent un réservoir d'innovations important. Le développement de compétences de niveau mondial dans plusieurs domaines scientifiques complémentaires dans une même zone géographique est alors indispensable pour stimuler et enrichir les hybridations. Ceci passe par une réelle politique scientifique des établissements d'enseignement supérieur et de recherche, par une coopération au niveau européen et par le développement de compétences de recherche dans l'industrie sur place.

L'analyse du développement économique des nanotechnologies suscite plus de questions qu'elle n'apporte de réponses. Si la convergence de plusieurs domaines technologiques semble être une trajectoire de développement identifiée par tous les observateurs, il est probable que certains acteurs empruntent des sentiers nouveaux, en contournant les compétences accumulées. Il est encore trop tôt pour que ces évolutions puissent être caractérisées et encouragées.

Bibliographie

- Avenel E, Favier AV, Ma S, Mangematin V, Rieu C., «Diversification and hybridization in firm knowledge bases in nanotechnologies», *Research Policy* **36** (6), 2007, pp. 864-871
- Birraux C, Revol H, *Rapport Sénat: microélectronique et nanotechnologies: une chance à saisir* (Actes du colloque: janvier 2003), Sénat, Paris, 2003
- Bonaccorsi A. Matching properties, «Research regimes and institutional systems in science», Paper prepared for the Workshop *Science as an institution, the institution of science*, Siena, Italy, 2002
- Darby M, Zucker L., «Grilichesian Breakthroughs: Inventions of Methods of Inventing and Firms Entry in Nanotechnology», *NBER*, Working Paper 9825, 2003
- Dupuy JP, Roure F., *Les nanotechnologies: Éthique et prospective industrielle*, Conseil Général des Mines, Paris, 2004
- Hill CWL, Rothaermel FT., «The performance of incumbent firms in the face of radical technological innovation», *Academy of Management Review* **28** (2), 2003, pp. 257-274
- Khun T., *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, Paris, 1970
- Mogoutov A, Kahane B., «Data Search Strategy for Science and Technology Emergence: A Scalable and Evolutionary Query for Nanotechnology Tracking», *Research Policy* **36** (6), 2007
- Nordmann A., «Converging technologies – Shaping the future of the European Societies», *HLEG Foresighting the New Technology Wave*, EC: Brussels, 2004
- Pautrat JL., *Demain le nanomonde: voyage au cœur du minuscule*, Fayard, Paris, 2002
- Robinson DKR, Rip A, Mangematin V., «Technological agglomeration and the emergence of clusters and networks in nanotechnology», *Research Policy* **36** (6), 2007, pp. 871-879