



HAL
open science

La construction d'une offre de formation dans les nanotechnologies

Séverine Louvel, Antoine Gonthier

► **To cite this version:**

Séverine Louvel, Antoine Gonthier. La construction d'une offre de formation dans les nanotechnologies. B. Miège et D. Vinck. Les masques de la convergence. Enquêtes sur sciences, industries et aménagements, Editions des archives contemporaines, pp.349-364, 2012. <halshs-00667844>

HAL Id: halshs-00667844

<https://shs.hal.science/halshs-00667844v1>

Submitted on 8 Feb 2012

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.



HAL Authorization

Pour citer ce chapitre :

Louvel, S. et A. Gonthier (2011). « La construction d'une offre de formation dans les nanotechnologies ». In Les masques de la convergence. Enquêtes sur sciences, industries et aménagements, sous la direction de B. Miège et D. Vinck, Paris, éditions des archives contemporaines, pp. 349-364.

LA CONSTRUCTION D'UNE OFFRE DE FORMATION DANS LES NANOTECHNOLOGIES

Séverine LOUVEL et Antoine GONTHIER¹

PACTE UMR 5194

UNIVERSITE DE GRENOBLE, CNRS, GRENOBLE, FRANCE

RESUME

Ce travail s'intéresse à la construction de l'offre de formation dans le secteur émergent des nanotechnologies (NT). Il s'agit d'abord de distinguer celles qui relèvent d'une simple actualisation de formations antérieures et celles qui innovent véritablement. Nous cherchons ensuite à mettre en lumière les déterminants (opportunités et contraintes) qui pèsent sur les acteurs lors de la construction de nouvelles formations en NT. Nous montrons ainsi que les différentes dynamiques d'innovation à l'œuvre se définissent à l'articulation entre des logiques technologiques (financement et gestion des dispositifs instrumentaux), institutionnelles (partenariats académiques et industriels, soutien des pouvoirs publics, rapports de force entre départements universitaires, écoles d'ingénieur, etc.), et professionnelles (gestion des carrières académiques, dynamiques d'emploi dans des disciplines ou des secteurs d'activité, etc.).

Mots clefs : nanotechnologies – formation – pluridisciplinarité – innovation pédagogique

INTRODUCTION

Les nanotechnologies représentent un terrain particulièrement fécond pour explorer les recompositions des formations universitaires, lorsque sont en jeu des renouvellements disciplinaires et le croisement de plusieurs disciplines.

A l'échelle internationale, deux thèses opposent les praticiens quant aux formations universitaires à développer dans les nanotechnologies (NT). Certains acteurs revendiquent l'invention d'un modèle de formation, au motif que les NT reposent sur une convergence inédite entre champs scientifiques éloignés par leurs objets et leurs méthodes, notamment la biologie et l'électronique. Il apparaît ainsi illusoire de spécialiser les étudiants dans toutes ces disciplines [Shapter *et al*, 2002], ce qui rend obsolète le modèle usuel de formation « en pyramide », organisé autour d'une spécialisation progressive. Les NT impliqueraient donc de penser un « modèle en sablier », avec une spécialisation disciplinaire jusqu'en licence ou master suivie d'un élargissement interdisciplinaire [Monk *et al*, 2004].

¹ Les auteurs remercient l'Agence Nationale pour la Recherche pour son soutien financier (projet ANR- 09-NANO-032-01).

A l'inverse, certains acteurs argumentent que les programmes universitaires en NT peuvent parfaitement se calquer sur les formations existantes dans les sciences pour l'ingénieur. Dans cette logique, les NT s'intègrent simplement – comme avant elles les technologies de l'information – à la palette des outils dont disposent les ingénieurs [Chang *et al*, 2008].

A de notables exceptions près [Stephan *et al*, 2007], la voix des sciences sociales ne se fait guère entendre dans ce débat entre praticiens. En particulier, la configuration des programmes d'enseignement (prédominance de telle ou telle spécialité, pratiques de l'interdisciplinarité, participation des industriels, prévision de débouchés pour les diplômés...) est encore mal connue.

Notre recherche a mis les deux thèses en présence à l'épreuve des programmes en NT créés sur le site grenoblois. Nous avons mené une dizaine d'entretiens avec des responsables de formation, analysé un ensemble de documents relatifs à celles-ci (maquettes d'enseignement, bilans, dossiers de demande d'habilitation de master, etc.), enfin effectué deux visites commentées de plates-formes expérimentales dédiées à ces enseignements.

Un état des lieux des formations affichant un contenu en NT permet tout d'abord de distinguer celles pour lesquelles la dimension « nano » procède d'une simple actualisation des contenus de celles qui innovent véritablement. Nous montrons ensuite que la continuité ou la rupture, et plus généralement les dynamiques d'innovation en matière d'offre de formation universitaire se définissent à l'articulation entre des logiques technologiques (financement et gestion des dispositifs instrumentaux), institutionnelles (partenariats académiques et industriels, soutien des pouvoirs publics, rapports de force entre départements universitaires, écoles d'ingénieur, etc.), et professionnelles (gestion des carrières académiques, dynamiques d'emploi dans des disciplines ou des secteurs d'activité, etc.).

ACTUALISATION OU INNOVATION POUR LES FORMATIONS EN NANOTECHNOLOGIES ? UN ETAT DES LIEUX

Sur le terrain, la problématique de l'innovation pédagogique pour « former les compétences de demain » se pose en plusieurs termes. Les acteurs dessinent ici une nette opposition entre les formations pour lesquelles le « passage aux nanos » s'inscrit dans une continuité et celles pour lesquelles ce passage implique d'une manière ou d'une autre des ruptures. Dans le premier cas, les NT requièrent surtout d'actualiser les contenus d'enseignement aux nouvelles connaissances et technologies, travail qui n'a rien de spécifique aux NT. Dans le second cas, les NT impliquent de repenser l'architecture des formations. Elles suscitent une véritable réflexion sur l'innovation pédagogique, au centre de laquelle se situe la question de l'interdisciplinarité.

Actualisation des formations

Du côté de l'actualisation, on trouve notamment deux formations : un master en micro et nanoélectronique et une filière d'école d'ingénieur en physique.

Au moment de l'enquête, le master en micro et nanoélectronique propose deux options, qui correspondent aux deux principaux secteurs d'activité de la microélectronique : l'une autour de la conception des systèmes intégrés et l'autre en physique des composants et des matériaux. Le vocable « nano » a été introduit dans le contrat quadriennal pour 2003-2006, mais le master prolonge des troisièmes cycles en microélectronique (DEA et DESS) créées dans les années 1980. Ces formations sont issues d'étroites collaborations entre les industries locales, des laboratoires de recherche technologique, et une école d'ingénieur.

Un responsable insiste, pour les activités de conception des circuits électroniques, sur la très forte continuité des formations, que ce soit sur le plan des enseignements, des collaborations ou des débouchés des étudiants : « *En fait, les formations dont je m'occupe sont plus axées sur ce contexte microélectronique qui a un historique finalement pas très récent et assez fort localement. A l'époque, on l'appelait le Dea de microélectronique, il était là bien avant moi, il doit avoir plus d'une vingtaine d'années.* »

Dans ce contexte, des restructurations récentes (notamment le déménagement et l'agrandissement de la plate-forme technologique dédiée aux enseignements), n'ont pas eu selon lui d'impact décisif sur la formation dans le domaine « conception », « *si ce n'est que les locaux sont plus adaptés à l'enseignement, il y a plus de place* ».

Puisque la « révolution nano » ne touche pas encore les procédés industriels, on pourrait penser que le passage de la micro à la nanoélectronique a davantage d'impact sur les masters recherche. Néanmoins, une part importante des étudiants inscrits en master recherche (parfois la quasi-totalité selon les années) sont des élèves ingénieurs de dernière année d'école inscrits en double cursus. Leur formation est quasiment identique mais ils effectuent un stage de fin d'études à dominante recherche, en laboratoire ou dans le service R&D d'une entreprise : l'obtention d'un master recherche dépend alors moins des cours suivis que du stage effectué. L'évolution vers la nanoélectronique a donc un impact très faible sur les programmes d'enseignement du master recherche.

La filière « physique et nanosciences » de l'école d'ingénieur a été créée en 2007-2008, à l'occasion d'une réforme plus large de l'organisation et des cursus d'enseignement. Les étudiants suivent des filières en 2ème et 3ème années d'école : celles-ci correspondent donc à une formation de niveau master. En parallèle de la 3ème année, ils peuvent s'inscrire en double cursus dans un master 2 recherche.

La filière est très récente, mais les enseignements s'appuient sur un long historique. L'un des responsables explique que la nouvelle filière regroupe deux options (l'une en physique fondamentale autour des matériaux fonctionnels et nanophysique, l'autre en physique des composants associée au développement local de la microélectronique et de l'optronique), qui étaient déjà fusionnées dans les années 1970 et 1980 dans un parcours de génie physique. Ainsi, cet acteur associe surtout l'architecture actuelle de la formation à une mise en cohérence pédagogique qu'autorise la réforme de l'école : « *Le regroupement ça fait pas mal d'années qu'on y pense. En gros on y fait les mêmes choses, dans un cas plus fondamental pour des élèves qui poursuivent en thèse de physique ; dans l'autre plus appliqué avec pour moitié des gens qui vont travailler dans la microélectronique (le plus souvent en R&D) ou pour l'autre qui fait des thèses CIFRE². Mais le fond ce sont les mêmes matières de physique. Il y avait peut-être 50% des cours communs.* »

La formation a une architecture « pyramidale » : en première année, les étudiants acquièrent « une culture scientifique large en physique et en sciences pour l'ingénieur » (plaquette de présentation). En deuxième année, ils choisissent, par un jeu de modules, de s'orienter vers la recherche via des masters co-habilités avec l'université ou vers l'ingénierie dans le domaine des composants.

Plusieurs universitaires insistent sur la continuité de l'offre de formation. L'introduction du vocable « nano » dans la nouvelle maquette ne signifie en rien une apparition soudaine des enseignements « nanos » dans le cursus : « *Le vocable 'nano quelque chose' n'était pas à la*

² Convention industrielle de formation à la recherche.

mode et vous ne le retrouverez pas dans les documents. Dans les syllabii des cours vous ne retrouverez rien sous ce vocable. Mais du point de vue des formations, ça concernait toutes les formations physiques, pratiques et théoriques, qui travaillaient sur la matière, matière et rayonnement ». Choisi pour son côté rassembleur et généraliste, l'intitulé de la filière reste d'ailleurs controversé et susceptible d'évoluer.

La formation aux microsystèmes, préfigurateur d'innovations ?

Les microsystèmes ou les MEMS (Systèmes MicroElectroMécaniques) ne relèvent pas des NT : l'évolution escomptée vers des systèmes de taille nano génère même des difficultés au plan de la recherche [Vinck, 2009] et n'a pour le moment qu'un impact marginal sur les enseignements. Pourtant, les formations aux microsystèmes préfigurent pour plusieurs acteurs certaines innovations pédagogiques que requiert l'enseignement des NT.

Ces formations sont d'emblée pluridisciplinaires : *« On a besoin de mécaniciens, de microélectroniciens, de technologues. Là, il faut de l'optique aussi. Quand on fait un micro miroir, il faut qu'il y ait des opticiens. Quand on va faire des choses en micro fluide, il faut la mécanique des fluides. Déjà par essence, c'est un sujet pluridisciplinaire »*. Elles s'adressent alors à des étudiants de plusieurs disciplines et/ou de plusieurs établissements. La spécialisation des étudiants dans toutes les disciplines impliquées devient par ailleurs impossible. Les étudiants acquièrent des briques élémentaires dans les différents domaines, et apprennent à les combiner. Le travail sur projet est essentiel à l'acquisition de telles compétences architecturales : *« C'est clair qu'on fait toujours attention à ça, qu'il y ait beaucoup d'enseignements par projets. Il faut qu'ils y aillent vraiment de façon autonome et c'est là qu'ils apprennent le mieux. Il y a toujours des profs pour encadrer mais ils ont plus d'initiatives à prendre, de recherche à faire. »*

Suivant en cela les évolutions de la recherche, et se saisissant aussi de l'occasion d'une réforme globale des écoles d'ingénieur du site, la filière « microsystèmes » proposée par l'une d'elles intègre à la fin des années 2000 les biotechnologies, cette dernière orientation étant proposée en Master 2. Un responsable voit dans cet élargissement une évolution très significative car elle conduit à collaborer avec des biologistes. Par ailleurs, des étudiants non biologistes peuvent s'orienter vers les biotechnologies. Cela suscite une autre innovation pédagogique, qui là encore préfigure les modèles de formation à développer dans les NT. Il s'agit du modèle de formation « en sablier » [Monk et al, op. cit.] avec une ouverture en M2 à des bases de la biologie : *« Il y a des cours justement spécifiquement pour ça où ils vont faire des bases de biologie (...). Ce n'est pas non plus de la biologie de haut vol, je pense. Il faut connaître un minimum et qu'ils puissent savoir communiquer avec des biologistes. »*

A la recherche de nouveaux modèles de formations

Deux cursus affichent, pour des raisons très différentes, des discontinuités importantes vis-à-vis des enseignements en place. Ces discontinuités s'inscrivent dans la recherche d'un modèle de formation considéré comme plus adapté aux NT.

Le premier cursus est un diplôme d'ingénieur en micro et nanotechnologies créé en 2006. Il est proposé conjointement par trois établissements européens qui accueillent les étudiants un semestre chacun, le dernier semestre étant réservé à un stage. Chaque établissement propose des enseignements dans sa spécialité (microsystèmes ; micro et NT ; microélectronique). Ainsi, au-delà d'un affichage « nanos », la formation est plutôt dédiée aux microsystèmes et à la microélectronique, ce que concède bien volontiers un professeur actif dans la formation qui compare, non sans humour, le master à un « pâté aux alouettes » : *« Alors là-dedans c'est comme dans tout le reste, c'est comme le pâté d'alouette. Vous savez il y a 95% de porc et 5% de pâté*

d'alouette, mais c'est du pâté d'alouette. » Deux raisons principales expliquent cette distorsion entre l'affichage et le programme : les débouchés industriels se situent encore massivement du côté des microsystèmes et de la microélectronique ; le modèle pyramidal de formation reste encore largement pertinent, dans les NT comme dans d'autres domaines technologiques.

Par contre, la dimension internationale de cette formation est relativement innovante dans le paysage français : cours en anglais, étudiants originaires des trois pays organisateurs ainsi que d'autres pays, mobilité étudiante chaque semestre. Ce dispositif n'est pas réservé aux micro et NT, toutefois le coût des équipements expérimentaux et la spécialisation, à l'échelle internationale, des sites de recherche dans certaines technologies, produisent ici des incitations très fortes.

Une deuxième caractéristique importante est le recouvrement des logiques de recherche et des logiques industrielles, le master ne pouvant être qualifié de master « professionnel » ou de master « recherche » : *« Le but du master est d'associer les aspects industriels très avancés et de donner des briques de base (voire plus) pour les aspects recherche. »* (Premier responsable) Les parcours des étudiants se différencient lors du stage : *« Il n'y a aucun cours supplémentaire (NB pour valider ce master en master recherche), la seule exigence de l'école doctorale est que le projet de fin d'études (PFE) ne soit pas strictement ingénieur et qu'il ait une coloration recherche. Beaucoup ont fait leur PFE à ST ou à Philips en Hollande. Mais comme leur formation se fait dans des sujets qui touchent la R&D il n'y a pas de difficultés pour que ce soit des sujets orientés recherche. »* (Deuxième responsable)

Cette fusion des parcours, présente également dans le master en micro et nanoélectronique, caractérise les secteurs technologiques basés sur la science (*science-based technology sectors*) comme les technologies de l'information et de la communication, les biotechnologies, etc., dans lesquels la recherche fondamentale est de plus en plus une source d'innovation et d'avantage compétitif [Lam, 2005]. On rencontre dans ces secteurs une absence de partage clair des rôles entre scientifiques et industriels (de manière schématique, les académiques déposent des brevets et les industriels publient !) et un pourcentage élevé d'emplois en R&D (40% dans les biotechnologies en 2001). Il se traduit aussi par un nombre élevé de poursuites en thèse, pour la plupart financées par les industriels via les conventions CIFRE.

Enfin, un dernier master proposé conjointement par l'université et par les écoles d'ingénieur, est très clairement identifié comme novateur dans le paysage des formations. La première année est organisée autour de quatre majeures (physique, physique-chimie, chimie, biologie et ingénieries pour la santé et le médicament). L'enseignement des NT intervient véritablement en M2, les étudiants pouvant alors choisir entre quatre spécialités (ingénierie des micro et NT, nanophysique et nanostructure, nano biotechnologies, nanochimie), avec une grande diversité de parcours possibles.

Les porteurs de ce master associent très directement innovation pédagogique, pluridisciplinarité et impératif des NT. Cet objectif revient tant dans les entretiens (*« avec ce master nous avons choisi la rupture avec d'emblée la pluridisciplinarité »*) que dans la maquette du master (*« En effet le mot qui revient sans cesse quand on évoque les nanosciences est « interdisciplinarité »*). La formation repose sur deux types d'innovations pédagogiques. Elle est tout d'abord organisée selon un modèle en sablier (ou une *« structure en T »*, responsable du master) plutôt que selon un modèle pyramidal, afin de pallier à l'impossibilité de spécialiser les étudiants dans toutes les disciplines : *« notre but n'est pas de former des « nanoscientifiques multicom pétents », ce qui est illusoire, mais de (...) leur donner des ouvertures vers d'autres disciplines afin d'acquérir le langage commun nécessaire pour collaborer avec des collègues de compétences complémentaires »* (Maquette du master). Cette pluridisciplinarité se retrouve dans les modules offerts en M2, dans les profils des

étudiants et dans la diversité des parcours possibles. La définition des nanosciences et NT comme combinaison de savoirs issus du « passage aux nanos » dans différentes disciplines, se traduit par l'appui très important du master sur des filières existantes : « *très peu d'UE seront créées spécifiquement pour les étudiants se destinant à une spécialité du master* ». Pour les travaux pratiques, le master s'appuie largement sur une plate-forme constituée en 2003-2004 (soit trois ans avant la création du master) au sein d'une plate-forme d'enseignement en micro et nanotechnologies (la plate-forme CIME-Nanotech³) et offrant dans un premier temps des TP (en microscopie à champ proche et à effet tunnel) aux étudiants de master de physique et de physique chimie.

Le deuxième champ d'innovations est une réponse à la difficulté de mettre en pratique la phase d'élargissement pluridisciplinaire du « modèle en sablier ». L'idée est donc de « *faire passer l'interdisciplinarité par la recherche et par les labos* » (Responsable du master). Cette interdisciplinarité expérimentale se réalise par l'immersion de binômes étudiants dans des laboratoires, 3 journées ½ par semaine pendant un mois : « *On ne sait pas très bien théoriquement ce qu'est l'interdisciplinarité, mais nous avons une réponse pratique d'expérimentateur. Le plus important c'est d'envoyer les gens dans les labos et de mélanger les étudiants* » (Idem).

ACTUALISATION OU INNOVATION, QUELLES LOGIQUES ?

De la mise à jour des enseignements (par exemple, introduire des TP de nanoélectronique dans une formation en microélectronique) à la refonte radicale d'un cursus, les acteurs de la formation universitaire en NT « bricolent », autrement dit réalisent leur projet avec ce qu'ils ont « sous la main » [Baker *et al*, 2003]. Quatre logiques vont, selon les cas, ouvrir ou fermer des possibles, donner des idées, pousser à la rupture ou inversement prolonger des pratiques antérieures.

Les logiques comptables et institutionnelles

Les logiques comptables pèsent très lourd dans la transformation ou la création de programmes de formation dans les NT. Les travaux pratiques requièrent en effet des équipements relativement coûteux, localisés sur les plates-formes technologiques du CIME-Nanotech. Les contraintes financières pèsent ainsi doublement. Elles s'exercent tout d'abord sur les responsables des plates-formes, qui doivent obtenir des financements de plusieurs institutions et attirer des utilisateurs : « *Ce que nous facturons aux utilisateurs ne couvre à peine 20 à 25 % du budget de Cime Nanotech. Le reste, c'est un budget qui est alimenté par des crédits demandés dans le cadre des contrats quadriennaux, la Région, l'Anr.* » (Directeur du Cime-Nanotech). Elles pèsent ensuite sur les enseignants chercheurs qui, soit ne trouvent pas localement les équipements utiles à leurs enseignements, soit les trouvent mais effectuent parfois des arbitrages en fonction du coût des travaux pratiques.

Ces contraintes financières sont toutefois très inégales selon les TP et donc selon les formations : un TP en salle blanche coûte ainsi 11 fois plus cher qu'un TP en salle de cours ; mais les TP de microscopie sont par exemple beaucoup moins onéreux. L'activité des plates-formes est aussi soumise aux fluctuations du nombre d'étudiants dans les filières : « *Certaines plates-formes ont commencé à subir le coût de baisse d'effectifs dans les filières scientifiques. Ça baisse, ça remonte, c'est la fluctuation. (...) On veille à avoir ce genre d'analyse pour voir effectivement sur le long terme s'il y a une activité qui est en train de mourir.* » (Directeur du Cime-Nanotech)

³ Centre Interuniversitaire de Microélectronique et Nanotechnologies. Le CIME-Nanotech fait partie d'un réseau national de 12 centres de formation regroupés au sein de la Coordination Nationale de Formation en Microélectronique (CNFM).

La nécessité de financer les équipements, et plus globalement d'alléger le coût des formations, conduit les acteurs locaux à étendre leurs collaborations ou à mutualiser certaines dépenses. Certains universitaires réfléchissent ainsi à des TP hors les murs, dont les coûts seraient mutualisés à l'échelle européenne ou mondiale. Localement, la plupart des demandes de financement d'équipements sont adressées à plusieurs établissements ; dans la mesure du possible les enseignements ne sont pas répliqués dans plusieurs cursus. Certains dispositifs servent à la fois les objectifs de sobriété dans les dépenses et d'innovation pédagogique. C'est le cas de l'implication de binômes étudiants dans des projets conduits en laboratoire (dernier master présenté). La maquette de la formation explicite toutefois bien que le coût élevé du dispositif (équivalent à 2500h de TP) est en grande partie reporté sur les laboratoires hébergeurs.

Les institutions jouent aussi un rôle d'incitation important dans la structuration d'une nouvelle offre de formation. D'abord parce qu'elles favorisent la mutualisation à l'échelle locale, (*« Côté université on avait fait une demande bonus qualité en formation et de son côté XX a fait une demande aux écoles d'ingénieur sur le bonus qualité enseignement. Dans les commissions, des gens ont dit « il y a peut-être des choses à mettre en commun ». Au départ, c'étaient deux idées séparées et qui en fait ont convergé. On a mis notre projet ensemble et on présenté un projet commun et de fait ça a eu plus d'impact »*), ainsi que la complémentarité à l'échelle nationale (voir la politique du CNFM), voire à l'échelle européenne pour les équipements particulièrement coûteux. Ensuite, elles permettent d'acquérir des compétences à l'interface entre les disciplines, en fléchant notamment des postes d'enseignants chercheurs (*« un Maître de Conférences en chimie va arriver. Il est responsable d'un Afm pour travailler en milieu liquide sur la plateforme de recherche Nanobio et on va commencer à mettre en place des Tp en milieu liquide »*). Par ailleurs, certaines instances permettent les échanges, la coordination, et autorisent ainsi la diffusion de modèles ou de pratiques. Des groupements comme le CNFM, financeur des formations en micro et nanoélectronique, ont un pouvoir de contrainte. D'autres (revues, conférences, réseaux internationaux) permettent d'importer certaines idées. Enfin, en formation comme en recherche, s'exprime aussi l'idée que le site grenoblois ne fait pas que suivre des exemples et qu'il peut servir de modèle pour d'autres sites, principalement pour deux raisons : d'une part la présence de « visionnaires », capables d'innover en matière d'interdisciplinarité, d'autre part la capacité locale à créer des synergies entre enseignement, recherche et industrie, en particulier dans les plateformes technologiques : *« On est en train de diffuser. Donc il y aura quelques centres en France qui seront équipés. Ils vont peut-être faire des trucs différents mais la philosophie vient d'ici »*.

En dernier lieu, les règles d'habilitation de formations, si elles n'ont rien de spécifique aux NT, peuvent expliquer la place réduite des enseignements « nanos » dans certains cursus : *« Comme on n'avait plus d'heures disponibles, le cours Nano s'est retrouvé dans le cours à option »*.

La concurrence entre formations

Les formations universitaires sont tout d'abord en concurrence lors des demandes d'habilitation auprès d'instances nationales comme la Commission des Titres d'Ingénieur (pour les écoles d'ingénieur) et le ministère (pour les diplômes de master). Les porteurs de projet sont en effet amenés à justifier rigoureusement pourquoi les besoins en formation ne sont pas couverts dans leur domaine. Des stratégies de différenciation vis-à-vis des formations en place et des dossiers concurrents peuvent conduire à innover et à proposer de nouvelles architectures de formation, au risque toutefois de sortir des standards d'évaluation des instances. C'est ainsi que l'ouverture vers l'international est favorable, mais que la formation co-organisée par des établissements de trois pays a pu, d'après ses responsables, susciter initialement certaines réticences à la CTI.

La concurrence se joue aussi pour attirer les étudiants dans sa filière. Les responsables la situent ici assez peu entre les filières locales de formations aux NT, positionnées sur des créneaux relativement distincts. Par ailleurs, l'imbrication interinstitutionnelle du site (co-habilitation des formations, participation des responsables au montage pédagogique de plusieurs formations, projets communs) permet de minimiser la concurrence traditionnelle entre les cursus ingénieurs et universitaires.

Les acteurs suggèrent qu'une concurrence peut se développer localement entre une formation labellisée « nano » et les formations « non nano », en sciences exactes ou non, et ce dans un contexte de désaffection des étudiants pour les formations scientifiques. Ils avancent que l'intitulé « nano » peut être introduit pour augmenter l'attractivité de la formation. Non sans humour, afficher des enseignements en « nanophysique » permettrait par exemple de conserver une certaine aura vis-à-vis des étudiants. Ces stratégies de labellisation, bien connues en recherche, sont clairement présentées pour les formations qui intègrent les NT par simple actualisation des contenus : *« Depuis le quadriennal 2003-2007 ça s'appelle Micro et nano électronique alors que le quadriennal d'avant, c'était encore microélectronique. Je pense qu'il y a un petit aspect communication là derrière pour attirer des étudiants. »* (Responsable d'un master en micro et nanoélectronique). Mais elles sont également évoquées pour des filières spécifiquement créées dans le contexte de montée en puissance des NT (cf. la métaphore du « pâté aux alouettes » citée ci-dessus par un enseignant).

Les relations aux milieux socioéconomiques

Les formations qui prolongent des cursus existants en microélectronique entretiennent des liens très étroits avec des partenaires industriels et des centres de recherche technologiques. Ceux-ci participent étroitement aux formations pour garantir une bonne adéquation des contenus à leurs besoins et pour suivre l'évolution des débouchés. Des intervenants professionnels assurent certains enseignements, parfois même la majorité : *« Pour le Master 2 Pro, les enseignants représentent la moitié voire les $\frac{3}{4}$ d'extérieurs »*. Par ailleurs, ils participent étroitement à l'actualisation des programmes : *« Tous les ans, on a une espèce de réunion où les intervenants du milieu industriel on discute de ce qui est important pour eux, comment ils ont trouvé le cours d'AFM et si les TP étaient adaptés à leurs besoins. »* Les équipements des plates-formes du CIME-nanotech répondent également aux besoins de partenaires industriels qui financent les formations, dans une tradition ancienne en microélectronique, à travers notamment l'action du CNFM. Les industriels financent aussi beaucoup de thèses notamment via les conventions Cifre : *« il y a aussi beaucoup de bourses de financement Cifre. Comme ce sont des sciences assez appliquées, les recherches sont assez directement applicables dans l'industrie et on a beaucoup de partenariats avec StMicroelectronics, des organismes comme ça. »* Enfin, les industriels soutiennent très directement la création de certaines formations, là encore dans la tradition de la microélectronique : *« Là, c'est un Master professionnel qui a commencé comme Dess. Il a plutôt été créé à la demande des industriels parce qu'il y avait un besoin important de personnes de niveau Bac + 5 dans le domaine de la conception. »*

Ces relations sont formelles (CNFM, participation aux conseils d'orientation de master ou aux conseils d'administration des écoles) ou bien informelles, les responsables insistant ici sur l'imbrication des réseaux de recherche et de collaborations industrielles, facilitée par la proximité géographique et par le cumul des fonctions : *« En fait les interactions sont multiples et permanentes et c'est vrai que pour ajuster l'enseignement, c'est plus simple (...) Le fait que tout soit concentré et que les gens finalement aient plusieurs casquettes, ça aide. »*

On peut se demander si ces partenariats étroits sont aussi présents dans des formations qui ne relèvent pas des prolongements de la microélectronique. L'exemple du dernier master présenté, et notamment de ses spécialités recherche, montre des partenariats industriels moins étroits, mais néanmoins présents. Enseignements et équipements dérivent tout d'abord de préoccupations de recherche, mais certains projets intéressent les industriels à une échelle de temps assez courte. Par ailleurs, les responsables sont soucieux de montrer aux étudiants que des techniques expérimentales comme les microscopes à force atomique (AFM), sont utiles et utilisées dans l'industrie. Enfin, si les équipements sont financés sur fonds publics, leur acquisition est grandement facilitée par leur appartenance à une structure cofinancée par les industriels (Cime Nano-Tech). Le fonctionnement de la formation bénéficie ainsi directement des partenariats étroits entre milieux industriels et formations de micro et nanoélectronique.

Néanmoins, l'intéressement direct des industriels reste limité. Plusieurs interlocuteurs reconnaissent qu'il s'agit d'une difficulté importante des masters « nanos » qui ne se situent pas dans le prolongement de la microélectronique car les débouchés sont réduits dans l'industrie. Cela se traduit notamment par un manque de financements CIFRE pour les doctorants, toutefois compensé par des financements académiques.

Enfin, alors que se multiplient les réflexions sur les enjeux sociaux, juridiques, économiques, liés à l'expansion des NT, les formations en la matière intègrent-elles ce champ de questionnement ? L'ouverture à l'« humanisme » est parfois considérée comme une dimension essentielle de l'innovation pédagogique dans les NT. Dans les visions les plus utopiques, la formation aux nanos pourrait réconcilier deux missions souvent antinomiques de l'université : former des humanistes (curieux, bénéficiant d'une culture large, conscients des enjeux sociaux, etc.) et former des entrepreneurs [Hawley, 2005]. En pratique, les formations sont pourtant conservatrices. Les interlocuteurs expliquent cette inertie par l'absence d'intérêt de la majorité des étudiants et des enseignants pour des questions qu'ils résument par le vocable « d'éthique », même si, sur le site de Grenoble, les manifestations d'opposants à l'ouverture du centre Minatec ont pu susciter une prise de conscience qui a permis de développer des modules de formation sur ces questions. Mais les quelques universitaires qui s'engagent pour développer ces enseignements refusent d'en faire une spécificité des NT, au motif que tout diplômé doit réfléchir aux implications de ses activités.

L'articulation entre les activités d'enseignement et de recherche

La plupart des lieux, échanges et activités par lesquels se mettent en place des programmes de formation se situent à l'interface de l'enseignement et de la recherche, ce qui pose le problème des relations (complémentaires ou concurrentes) de ces activités.

Cette question se pose tout d'abord s'agissant de l'utilisation des équipements des plates-formes technologiques. Le développement des activités en NT sur le site, conduit à séparer formellement les équipements à finalité enseignement et à finalité recherche, ce qui n'était pas le cas jusqu'aux années 2000. Ce changement nécessite de repenser les politiques d'acquisition et les règles d'utilisation des équipements : *« Avant sur l'ancien site, (...), il y avait une activité recherche, c'était une mission qu'on pouvait afficher sans problème parce qu'il n'y avait pas d'alternative et paradoxalement on ne pouvait pas totalement l'honorer. Maintenant on peut totalement l'honorer mais on ne peut plus l'afficher. »* (Directeur du CIME-Nanotech)

La synergie entre enseignement et recherche apparaît sur le terrain des équipes et des programmes pédagogiques. Les innovations pédagogiques sont en effet très largement cadrées par les pratiques de recherche. Celle-ci apporte la matière première, à savoir les idées novatrices

pour les enseignements : « *Pour avoir un bon projet en enseignement, il faut avoir des idées originales. Les idées originales découlent de la recherche qu'on a fait en amont* ». Les acteurs n'opèrent pas leur choix en fonction d'un intérêt scientifique exprimé dans l'absolu, mais plutôt en fonction de critères dont ils reconnaissent volontiers le caractère contingent, comme leurs affinités pour un sujet : « *Il y a un grand potentiel d'ouverture mais c'est toujours pareil, l'impulsion doit être donné par ceux qui s'en occupent. Moi, personnellement, je suis plus attiré par le liquide et l'ouverture vers la biologie, c'est cette ouverture là que je suis en train d'impulser* ».

La recherche apporte également des réseaux de collaborations. Ceux-ci permettent de trouver et de mettre en œuvre des idées originales, notamment interdisciplinaires. Ils facilitent les ententes voire limitent les conflits autour de certaines chasses gardées : « *les gens qui mutualisent des enseignements se connaissent déjà, ils font des cours similaires, travaillent dans le même labo... La recherche imbrique facilement les gens. Ils travaillent déjà ensemble en recherche donc ça se fait assez naturellement en enseignement.* » Plusieurs intervenants reviennent ici sur les traditions de collaboration plus fortes localement que sur d'autres sites, favorisées par la proximité géographique des écoles et des laboratoires, récemment renouvelée par la construction de Minatec.

Certains interlocuteurs estiment que l'innovation pédagogique manque d'un appui institutionnel dédié, à l'image de ce qui se pratique notamment dans les pays anglo-saxons via les départements en sciences de l'éducation : « *Je ne suis pas arrivée à trouver quelqu'un que je pourrais aller voir et lui dire « je monte des Tp, c'est tout nouveau dans mon domaine, est-ce que vous pouvez m'aider ? (...) Alors qu'en Angleterre, aux Etats-Unis, comme vous avez un département d'enseignement, je suis sûre que vous pouvez trouver des choses dans les sciences de l'éducation.* »

Enfin, le montage de nouvelles formations demande un investissement individuel important aux porteurs de projets. Ici apparaît une difficulté bien connue à concilier les engagements dans la recherche et dans l'ingénierie pédagogique, dès lors que les carrières académiques reposent en grande partie sur les réalisations en recherche et notamment sur les publications. Les acteurs estiment que les investissements pédagogiques sont peu rétribués même si certaines institutions accordent des compensations sous forme de décharges d'enseignement. Certains espèrent que les responsables de formation en nanosciences et NT issus de disciplines comme la physique ou la biologie pourront à l'avenir valoriser leur investissement pédagogique sur le modèle de ce qui se pratique dans les sciences pour l'ingénieur : « *Il faut quand même que j'arrive à le valoriser dans ma carrière et en fait on a de plus en plus de revues sur l'enseignement. C'est très développé côté écoles d'ingénieur, les enseignants ont vraiment cette culture d'écrire. C'est une culture d'ingénieurs de dire quels Td on fait, pourquoi on le fait, faire le lien avec l'industrie et ils ont cette culture là ; par contre à l'université on l'a beaucoup moins puisqu'on forme des étudiants généralistes* ».

CONCLUSION

Ce chapitre se proposait de mettre à l'épreuve d'un terrain deux thèses (la continuité versus la rupture) qui opposent les praticiens en matière de formation aux NT. Au cours de cette analyse, nous avons montré que la montée en puissance des nanosciences et NT modifie très marginalement certains cursus de formation (en physique de la matière et en microélectronique), alors qu'elle a un impact important sur d'autres cursus qui proposent une approche pluridisciplinaire. Ces derniers sont amenés à développer certaines innovations pédagogiques : « pluridisciplinarité expérimentale », formation en sablier en master 2, enseignement par projet, modularité des formations, internationalisation des parcours pour répondre à des contraintes

expérimentales, etc. Pourtant, l'exemple des formations aux microsystèmes (qui ne font pas partie des NT) montre bien qu'une telle pédagogie n'est en rien spécifique aux NT et qu'elle caractérise plus largement les formations technologiques. Comme l'exprime un responsable, Auguste Comte (et avec lui, la séparation stricte entre les disciplines) peut continuer à sévir dans les disciplines théoriques, alors que cela est impossible dans les formations technologiques. Les nanosciences et NT contribueraient ainsi à étendre un modèle pédagogique présent dans les formations technologiques et notamment dans la microélectronique et les microsystèmes. Il reste néanmoins une différence importante : l'implication des industriels dans les formations, structurante dans les formations technologiques, n'est pas toujours acquise.

Ce travail a également mis en évidence plusieurs facteurs qui pèsent sur l'évolution ou la création de formations. On a ainsi observé que les innovations pédagogiques sont très fortement cadrées par des logiques financières et institutionnelles (financement des équipements, critères d'élaboration des maquettes, etc.), par l'existence d'une concurrence entre les formations « nanos » et les autres formations, par les partenariats avec le monde socioéconomique. Ces facteurs génèrent des contraintes, mais ils apportent aussi des opportunités et sont en un sens des vecteurs de l'innovation. En tout cas, ils suscitent le déploiement d'un véritable entrepreneuriat académique pour lever des fonds, monter des dossiers, négocier avec ses collègues et sa hiérarchie, etc. Une attention particulière peut être accordée à l'articulation entre les activités d'enseignement et de recherche. En effet, on avance souvent que le coût des équipements technologiques associés rend l'enseignement des nanosciences et NT dépendant de la recherche ou tiré par la recherche (« *academic driven* »). Nous avons ici établi que les relations entre enseignement et recherche sont plus complexes. Si la gestion des équipements et les logiques professionnelles (notamment relatives au déroulement des carrières) génèrent ainsi des situations de concurrence, enseignement et recherche sont complémentaires lorsqu'il s'agit de développer les programmes de formation : la recherche alimente l'enseignement (en idées et en collaborations), inversement l'enseignement alimente la recherche (via le troisième cycle). Les collaborations qui conduisent à ce cercle vertueux sont très souvent « encastrées » dans des relations personnelles (forte interconnaissance, affinité de quelques chercheurs pour certaines approches et questions de recherche) [Grossetti *et al*, 2001]. Le développement d'institutions dédiées aux NT autorise toutefois le déploiement de collaborations moins personnalisées (via des conférences, des partenariats institutionnels avec des universités étrangères, des réseaux formels d'échange, etc.). Ces institutions permettent aussi de « découpler » certaines collaborations, autrement dit de les abstraire des relations personnelles.

Enfin, cette analyse a permis de mettre en évidence un acteur présent/absent, au cœur des dispositifs concernés mais toujours représenté, à savoir l'étudiant. Dans une situation de désaffection pour les études scientifiques et de concurrence entre les formations, il est en effet essentiel de connaître ses préférences, de savoir comment l'attirer vers la formation. Cet enjeu n'a là encore rien de spécifique aux NT, mais il entraîne ici des conséquences financières particulièrement lourdes, du fait du coût des équipements technologiques et des contraintes de financement des plates-formes.

BIOGRAPHIE

Séverine Louvel est chercheure au laboratoire PACTE et maître de conférences en sociologie à l'Institut d'Etudes Politiques de Grenoble. Elle coordonne un projet de recherche de l'ANR sur les trajectoires professionnelles en nanosciences et nanotechnologies (projet HybridTrajectories, ANR Blanc 2010) severine.louvel@iep-grenoble.fr

Antoine Gonthier est diplômé de l'Institut d'Etudes Politiques de Grenoble et assistant de recherche au laboratoire PACTE. antoine_gonthier@yahoo.fr

BIBLIOGRAPHIE

BAKER, T., MINER, A.-S., EESLEY, D.-T., « Improvising firms: bricolage, account giving and improvisational competencies in the founding process », *Research Policy*, 2003, vol. 32, 2003, p. 255-276.

CHANG, T., FREEMAN, R., « Nanotechnology : recommendations for regional policy makers », Science and Engineering Workforce Project, National Bureau of Economic Research, Cambridge, Massachussets, 2008.

GROSSETTI, M., BES, M.-P., « Encastremets et découplages dans les relations science-industrie », *Revue française de sociologie*, vol. 42, n°2, 2001, p. 327-355.

HAWLEY, M., « Whither the Renaissance man? », *Technology Review*, mai 2005.

LAM, A., « Knowledge Networks and Careers: Academic Scientists in Industry-University Links », *Journal of Management Studies*, n°44, 2007, p. 993-1016.

MONK, R., POPOVIC, G., TOMELLINI, R., « Education et formation en NT. Une nouvelle génération de chercheurs européens. », *Réalités industrielles*, 2004, p. 22-27.

SHAPTER, J.-G., FORD, M.-J., MADDOX, L.M., WACLAWIK, E.R., « Teaching Undergraduates Nanotechnology », *International journal of engineering education*, vol. 18, n°5, 2002, p.512-518.

STEPHAN, P., BLACK, G.-C., CHANG, T., « The small size of the small scale market : the early-stage labor market for highly skilled nanotechnology workers », *Research Policy*, vol. 36, n° 6, 2007.

VINCK, D., « Le "passage aux nanos" : comment un laboratoire s'arrange avec des incertitudes majeures ? » in CHALAS, Y., GILBERT, C., VINCK, D., *Comment les acteurs s'arrangent avec l'incertitude*, Paris, Editions des archives contemporaines, 2009, p. 23-40.