

Conclusions communes

La partie scientifique de ce rapport s'adresse surtout aux professionnels de la recherche et de la technologie : elle veut éveiller l'enthousiasme pour un domaine en pleine effervescence, riche d'idées nouvelles et d'applications prometteuses. Mais l'enthousiasme des individus ne peut s'épanouir que si les institutions leur donnent les moyens nécessaires. Les recommandations qui suivent s'adressent aux décideurs responsables de ces institutions.

L'émergence des nanosciences et des nanotechnologies est une petite révolution qui bouscule les cadres traditionnels de la recherche publique. Pluridisciplinaire par essence, elle implique une collaboration étroite et permanente entre des champs disciplinaires en général très cloisonnés. Exigeant des investissements importants, tant au niveau national qu'au niveau local, elle implique une vision à long terme, typiquement dix ans, ainsi qu'une continuité dans l'effort qui est incompatible avec les fluctuations budgétaires que nous avons souvent connues dans le passé. Parce que c'est une aventure audacieuse, elle implique une grande souplesse de gestion des moyens et des personnels, difficile dans le carcan des règles de la fonction et de la comptabilité publiques. Parce qu'une entreprise audacieuse doit rendre des comptes, elle implique un contrôle scientifique réel, interne pour la gestion au jour le jour par le biais d'un conseil scientifique responsable des options retenues, externe en fin de compte par un conseil d'évaluation fortement ancré sur des spécialistes étrangers, capables d'exprimer des avis peut-être douloureux, mais objectifs, exempts du poids des groupes de pression qui existent dans toute communauté. Bref, il faut sortir du fonctionnement un peu routinier que nous connaissons, plus enclin à poursuivre ce qui existe qu'à sortir des chemins battus.

Il est tentant d'encourager un domaine nouveau par des structures nouvelles : on peut imaginer une « Agence Nationale des Nanosciences et Nanotechnologies » — appelons la A3N — qui jouerait un peu le

XXVI Nanosciences – Nanotechnologies

même rôle que l'IN2P3 pour la physique nucléaire et la physique des particules. De fait, nous plaiderons pour la création d'une telle structure, seule capable à notre sens de faire émerger une réelle complicité entre des disciplines toujours rivales, seule capable de réaliser des investissements importants bien ciblés. Mais cette A3N doit être une agence de moyens limitée dans le temps, et non pas une institution pérenne, tôt ou tard empêtrée dans des problèmes de gestion de ses personnels. Nous pensons que la création d'une institution centralisée serait très néfaste, pour plusieurs raisons.

En premier lieu, le contexte scientifique est différent pour physique des particules et nanosciences. Les premières s'articulent autour de quelques très gros instruments, nécessairement centralisés (la physique « légère » de l'IN2P3 reste exceptionnelle, même si certaines applications sont remarquables). À l'inverse, les nanosciences couvrent toute une hiérarchie de laboratoires, depuis les grosses plates-formes nationales, réminiscences d'un gros accélérateur, jusqu'aux petites équipes universitaires locales qui bien souvent sont le fer de lance de l'innovation. Cette diversité fait la richesse du domaine : il faut savoir maîtriser les investissements lourds pour protéger des équipes locales originales et créatives. Ce n'est pas facile dès lors qu'un organisme mélange choix scientifiques et responsabilités de gestion. L'A3N doit rester un organe scientifique.

Par ailleurs l'adolescence des nanosciences n'aura qu'un temps ! Tôt ou tard elles atteindront leur maturité et s'intégreront naturellement dans les grandes disciplines scientifiques, sans plus requérir de traitement spécial. Elles seront devenues des techniques reconnues et maîtrisées, parties prenantes de la physique, de la chimie ou de la biologie. Qu'on songe à la situation de l'électronique dans les années cinquante, alors apanage des spécialistes, aujourd'hui intégrée dans la vie quotidienne ! Hélas les sujets passent, mais les instituts restent ! Il est donc impératif de ne pas rendre *de facto* une A3N pérenne. La structure doit être provisoire, soumise à un examen critique à chaque étape de son renouvellement, capable de se dissoudre lorsque son temps sera venu. Cela suppose un certain nombre de précautions sur la gestion des personnels : nous y reviendrons plus loin.

Dans cette conclusion, que nous avons voulue commune aux physiciens, aux chimistes et aux technologues, nous tentons de cerner tous ces problèmes et nous proposons des pistes. Notre discussion s'articulera autour de trois thèmes, *les acteurs* (formation, gestion des personnels, collaboration entre disciplines), *les moyens* (de la grande plate-forme nationale aux petites équipes, avec une large diffusion des outils essentiels à tous les niveaux et un accès facile aux moyens plus lourds), *les structures* (combinant fonctionnement de type contractuel, souplesse de gestion et évaluation sérieuse). Tous ces aspects sont largement intriqués : on ne fait pas de bonne recherche sans chercheurs de talent. Ceux-ci ne s'épanouissent que s'ils ont moyens et liberté.

1 ■ Les acteurs

Une base solide existe déjà : la communauté française est riche d'équipes de grande qualité. Mais elles sont souvent très ciblées et la collaboration transdisciplinaire est rare. C'est au niveau de la formation que cette situation évoluera. De toute manière, quel que soit le talent des acteurs actuels, un apport de sang neuf est nécessaire pour développer le domaine. Il ne s'agit pas d'ouvrir un robinet de crédits supplémentaires, mais bien de changer l'esprit de la recherche et de créer des voies nouvelles. Pour cela il faut attirer les meneurs de demain. Cela pose des problèmes de formation, mais aussi de gestion des personnels dans une structure de durée finie. Commençons par la formation.

Force est de constater que les physiciens qui sortent aujourd'hui de l'Université ne savent rien en chimie et *vice versa*. Aspirées par l'attrait des nouveautés, les spécialités se sont spécialisées à l'extrême : à quelques exceptions près, physiciens et chimistes parlent des langages différents. Un physicien ne sait pas ce qu'est un pH, un chimiste ce qu'est l'effet tunnel ! La situation est encore pire à l'interface avec la biologie, pourtant un partenaire en plein essor du nanomonde. La sophistication des mots cache les concepts les plus simples : comment dans ces conditions faire dialoguer des communautés qui ne se comprennent pas ?

Il faut donc ouvrir des passerelles, initier les uns aux concepts des autres. Mais le problème est délicat, car il ne faut pas diluer les talents ! Physique, chimie et biologie ont chacune leur propre mode de pensée, qui fait leur richesse. À contexte différent il faut une démarche différente : pour citer les grands auteurs, un « volapük intégré » risque de stériliser chaque partenaire en brouillant sa créativité. Transformer un bon physicien en mauvais chimiste n'arrangera rien et réciproquement. Tant au niveau des formations que dans les laboratoires, il paraît donc préférable de garder son âme à chaque champ disciplinaire. Les DEA devraient rester ciblés sur la physique ou sur la chimie, mais avec une forte composante d'ouverture sur les autres volets. Cela exige clairement des formations spécifiques aux nanosciences, ouvrant l'esprit des étudiants aux mondes qu'ils ne connaissent pas. En fait cet effort d'ouverture ne peut se faire en un an : il doit commencer avant le DEA. Toucher à la licence semble bien difficile dans la mesure où elle interfère avec la formation des maîtres, mais une année de maîtrise spécifique est envisageable (dans l'esprit du système « 3-5-8 » qui se généralise en Europe). Au-delà d'un tronc commun minimum, un large choix d'options « à la carte » devrait permettre de combler les lacunes les plus criantes. La même souplesse devrait se poursuivre en DEA.

Il ne faut pas oublier que nanosciences et nanotechnologies sont avant tout des sciences expérimentales : une formation de DEA doit impérativement mettre les étudiants au contact des réalités du nano-

XXVIII Nanosciences – Nanotechnologies

monde. Chaque université doit donc disposer d'une petite salle « blanche » (« grise » ?) où les étudiants viendront faire leurs armes et se familiariser avec les contraintes du domaine qu'ils abordent. Cet investissement doit être modeste, certes, mais suffisant pour réaliser une structure, la tester et l'exploiter.

Une fois passée la formation initiale, comment faire travailler ensemble physiciens et chimistes, recherche fondamentale et appliquée ? Nous pensons que mettre tout le monde dans un grand bâtiment n'est pas la solution miracle. Ici encore chaque discipline a son âme, et il est plus efficace de laisser les gens travailler dans un environnement dont ils connaissent les possibilités. En revanche, on peut les rassembler autour d'un projet scientifique et d'un financement communs. La collaboration ne se commande pas : elle s'impose dès lors que l'un a besoin de l'autre. C'est au niveau des projets que le dialogue doit démarrer, c'est dans leur mise en œuvre progressive qu'il doit se concrétiser. La participation active aux colloques et séminaires, l'accueil des visiteurs souderont les participants mieux qu'une cohabitation formelle. L'essentiel est l'émergence de projets *communs*, menés *de concert*, qui engagent à parts égales tous leurs partenaires.

Restent les problèmes matériels : comment assurer une carrière normale aux chercheurs et techniciens dans une structure temporaire ? Ceux qui, tentés par l'aventure, viendront sur des contrats à durée limitée ne posent pas de problème : leur contrat terminé, ils repartiront sous d'autres cieux, riches d'une expérience fructueuse. Notons qu'il faut pouvoir attirer quelques experts internationaux de haut niveau, apportant des compétences que nous ne possédons pas — et donc leur offrir des conditions appropriées : ces contrats temporaires ne peuvent être limités par les règles de la fonction publique. Mais ils resteront exceptionnels : la majorité (surtout les jeunes) se lancera dans les nanosciences avec l'idée de faire carrière dans la recherche. Il est donc impératif de les rattacher dès le départ à un laboratoire stable et pérenne. Le schéma qui émerge ainsi est celui d'unités traditionnelles, relevant au plan administratif des institutions habituelles, *associées par contrat à l'A3N*. Les chercheurs sont recrutés et gérés par les unités, l'A3N leur fournit des moyens spécifiques sur programme. Il appartient au laboratoire partenaire de défendre leur carrière au sein de chaque organisme (universités, CNRS, CEA, etc.). *L'A3N apparaît ainsi comme une agence de moyens, et non comme un organisme ayant pignon sur rue, du personnel, etc., comme le fait l'IN2P3.*

2 ■ Les moyens

Quand on parle nanosciences, on pense immédiatement aux équipements lourds de la microélectronique, capables de fabriquer en

grande série un grand nombre de circuits exempts de défauts. Les investissements sont alors pharaoniques — et inévitables ! Mais il faut préciser que cette situation extrême n'est pas celle de la recherche et du développement. Les moyens d'élaboration nécessaires sont alors sans commune mesure avec ceux des grandes plates-formes. En fait, nanosciences et nanotechnologies couvrent toute une hiérarchie de systèmes, qui va de l'élément unique à la plaque de silicium de 300 mm. Pour rendre la recherche créative et efficace, il est essentiel de respecter cette hiérarchie. C'est sur de petites structures, faciles à réaliser et à modifier, que l'on développe des concepts nouveaux : il faut pouvoir essayer, infléchir une idée au vu des premiers résultats, expérimenter de nouvelles géométries — toutes choses impossibles dans une structure lourde. De toute manière, les structures lourdes sont en général ciblées sur un matériau donné (souvent le silicium). Les nanosciences de demain feront appel à des matériaux très divers, le cobalt pour le magnétisme, les matériaux fluorescents pour l'optique, etc. Explorer cette diversité ne peut se faire qu'à petite échelle.

Certes quelques grandes plates-formes aux très hautes performances sont nécessaires pour gérer le passage du laboratoire à l'industrie. Elles constituent un investissement considérable : il est hors de question de les multiplier. Celles qui existent à Paris, Lille, Grenoble et Toulouse semblent suffisantes. Encore faut-il exploiter intelligemment ces centres de compétences exceptionnelles. On peut les utiliser comme un service pour des demandes d'une technologie classique bien maîtrisée, qui s'intègrent alors naturellement dans une filière. Pour des demandes plus spécifiques, en revanche, il faut une véritable collaboration scientifique entre les chercheurs des centrales et les demandeurs, voire une implication réelle de ces derniers dans la fabrication. Les exemples partout dans le monde montrent que seule cette synergie permet d'exploiter au mieux les capacités de fabrication des centrales.

Mais une vraie innovation ne peut être que décentralisée : en amont chaque équipe reconnue doit disposer localement de moyens d'élaboration modestes, mais efficaces, lui permettant de tester une idée ou de débroussailler un phénomène. Lorsque l'idée prend forme, elle peut avoir besoin d'installations intermédiaires plus performantes, donc plus rares, et éventuellement des moyens exceptionnels d'une grande plate-forme. *Cette hiérarchie de moyens est essentielle.* Elle s'applique à la caractérisation comme à l'élaboration (la microscopie en champ proche joue aujourd'hui pour les nanosciences le même rôle que l'électronique il y a 50 ans !). Au bout du compte la culture « nano » passe par la dissémination des technologies de nanofabrication en de multiples endroits. La nanofabrication pour la recherche n'est pas une activité très coûteuse, du moins comparée aux coûts supportés pour les applications. À l'autre bout de la chaîne, il faut favoriser de petites plates-formes, moins ambitieuses. Pour le même budget, plus de personnes

seront formées, qui ne seront pas de simples utilisateurs externes, et cela forcera les équipes à collaborer !

Dans un rapport comme celui-ci, il est bien difficile de chiffrer la part budgétaire des gros investissements et celle des équipements de base disséminés dans les équipes amont. L'expérience des grands instruments — et encore plus celle du CERN — montre qu'un équipement de cette taille est un gouffre de crédits, où l'investissement passé entraîne automatiquement l'investissement futur. Le danger est grand d'étrangler les petites équipes parce que les dépenses des grandes sont « incompressibles ». Nous pensons qu'un effort national dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies doit avoir le courage de faire des choix, et de les tenir dans le temps. Il faut séparer clairement les masses budgétaires affectées aux grandes installations d'une part, de celles affectées aux équipes de base disséminées d'autre part. Il faut surtout ne pas remettre ces équilibres en question chaque année au gré des fluctuations politiques. Les pourcentages de ces deux grandes masses doivent faire l'objet de discussions *scientifiques* sérieuses, étayées par des avis extérieurs d'experts internationaux. Un tel jugement scientifique, objectif, devrait permettre de réduire la lutte d'influence des organismes concernés. À l'intérieur de la recherche de base, le partage entre recherche fondamentale et applications semble plus facile. Nous pensons que les ordres de grandeur devraient être comparables.

3 ■ Les structures

Nous pensons que le développement rapide des nanosciences et des nanotechnologies exige la mise en place d'un organisme spécifique, du type A3N dont nous avons déjà abondamment parlé. Cet organisme doit être indépendant des grandes institutions comme le CNRS ou le CEA, et surtout de leurs découpages sectoriels. Contrairement à des structures comme l'IN2P3 ou l'Insu, il doit rester une agence de moyens, chargée de stimuler et d'évaluer l'effort national. L'A3N suscite des programmes et les soutient sur une base contractuelle. L'initiative doit être locale, reflétant la grande dissémination des petites équipes amont.

Le soutien de l'A3N est ouvert à toutes les institutions engagées dans les nanosciences. Un de ses rôles est de stimuler la collaboration active entre équipes issues d'horizons différents. La mise en commun de moyens et leur gestion quotidienne est un ciment plus efficace que la juxtaposition formelle dans un même bâtiment. Les équipes retenues par l'A3N restent dans leur laboratoire d'origine. Lesdits laboratoires doivent participer activement au programme scientifique, ne serait-ce que pour éviter une marginalisation des chercheurs.

La gestion de ce système doit impérativement permettre une réaction rapide et efficace aux évolutions et aux idées nouvelles. Dans ce domaine qui évolue très vite, une année de retard peut être fatale. Il faut donc un contrôle scientifique continu et non pas à échéances fixes, et surtout une extrême souplesse. Cela implique l'autonomie financière, un financement de l'A3N par grandes masses et un contrôle *a posteriori* des dépenses. La répartition de ces masses budgétaires doit relever d'un conseil scientifique interne, comprenant une majorité de membres extérieurs pour éviter toute tentation d'équipartition. Ce conseil doit inclure des représentants des secteurs fondamentaux et appliqués, et aussi de la recherche industrielle. Un choix scientifique particulièrement important est le partage global entre grandes plates-formes et unités locales. C'est là que se mesurera l'impact national de ce programme.

Pour permettre une politique scientifique dans le temps, les engagements financiers doivent être relativement longs, typiquement trois ans. Mais engagement à moyen terme ne veut pas dire laxisme : le suivi scientifique des études doit être permanent. Il doit se faire *avant*, au niveau de l'affectation des crédits, *pendant* pour détecter très tôt d'éventuelles impasses, et *après* pour juger la pertinence des résultats acquis et orienter les programmes ultérieurs. Les deux premières étapes relèvent du conseil scientifique interne, suivant au jour le jour la vie de l'A3N et en contact permanent avec tous les acteurs. L'audit final devrait impliquer un *visiting committee* international, seul capable de s'affranchir des situations individuelles pour replacer la politique scientifique dans un cadre global.

La mise en place d'une telle A3N n'est pas une opération neutre. On a trop souvent tendance à créer une coquille vide et à la remplir ensuite plus ou moins bien. Les difficultés se découvrent après coup. À notre sens, il serait préférable de constituer un conseil scientifique provisoire, chargé de mettre le système en route. Ce conseil provisoire, au spectre très large, rédigerait un appel d'offre auprès des laboratoires de base, quelle que soit leur échelle. Il pourrait démarrer le processus par une première génération de contrats, et passer très vite la main à la véritable A3N, qui façonnerait son fonctionnement à la lumière de l'expérience acquise dans cette étape initiale. De toute manière, une montée en puissance progressive est essentielle. Engager trop tôt une part importante du financement serait une erreur car il faut garder une marge de manœuvre !

Bien d'autres points mériteraient réflexion. Par exemple l'effort français s'inscrit nécessairement dans un cadre européen. Comment harmoniser ces deux politiques, faire que l'une féconde l'autre ? La question est essentielle. Dans un autre cadre, comment créer une véritable synergie entre la recherche pure et appliquée d'une part, le monde industriel d'autre part ? Un dialogue existe — mais en faire sortir des projets communs est difficile. Il manque souvent un échelon intermédiaire entre le chercheur et l'industriel, un partenaire qui parle les deux langages. Ce sont là des exemples : il est clair que ce rapport ne saurait être exhaustif.

