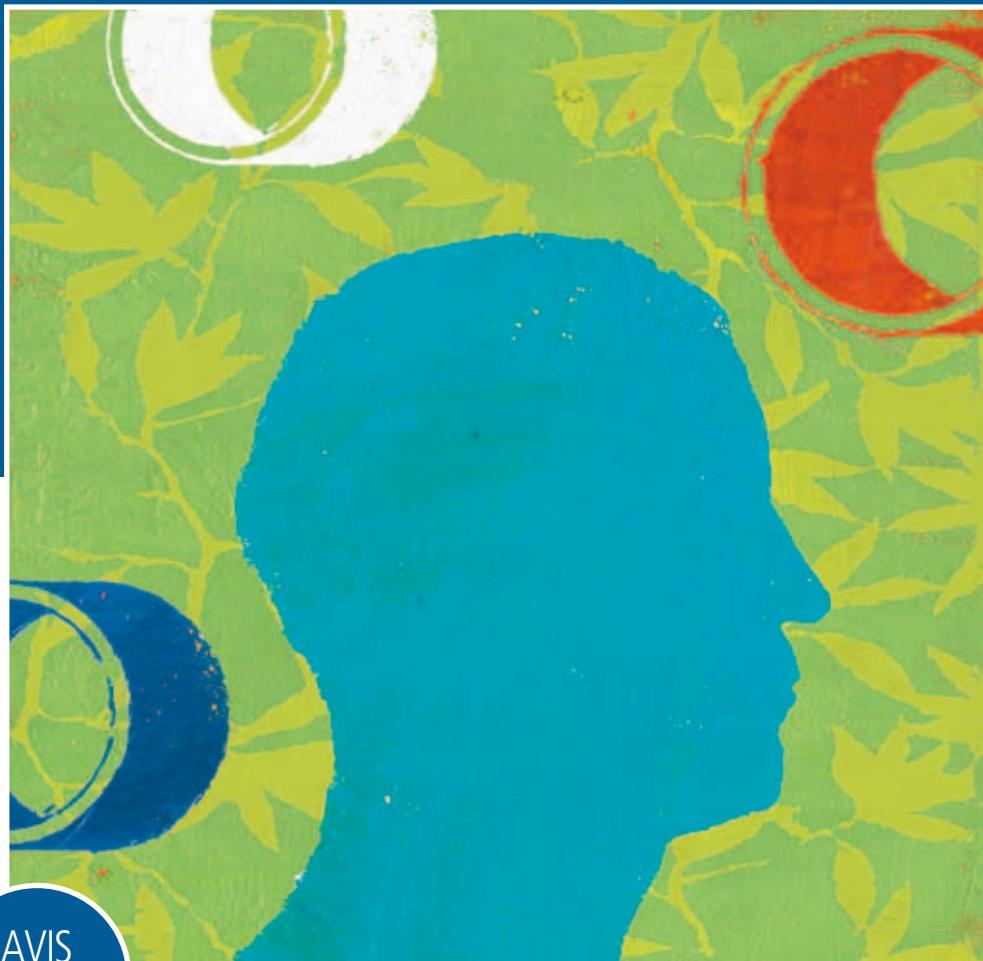


Comité consultatif commun
d'éthique pour la recherche agronomique



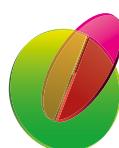
AVIS

4

SUR les nanosciences
et les nanotechnologies



INRA



cirad

Sommaire

- 1 INTRODUCTION PAR LE PRÉSIDENT DU COMITÉ**
- 3 LE COMITÉ D'ÉTHIQUE : MISSIONS ET COMPOSITION**
- 4 LES PRINCIPES ET VALEURS DU COMITÉ D'ÉTHIQUE POUR LA RECHERCHE AGRONOMIQUE**
- 5 AVIS SUR LES NANOSCIENCES ET LES NANOTECHNOLOGIES**
 - 6 1 ■ INTRODUCTION**
 - 6 2 ■ PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES NANOTECHNOLOGIES**
 - 11 3 ■ APPLICATIONS DANS LE DOMAIN DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION (AVÉRÉES ET POTENTIELLES)**
 - 15 4 ■ NANOTECHNOLOGIES À L'INRA ET AU CIRAD**
 - 17 5 ■ DES RISQUES À ÉVALUER ET À GÉRER**
 - 18 6 ■ NANOTECHNOLOGIES ET PAYS DU SUD**
 - 21 7 ■ QUESTIONS ÉTHIQUES : POUR UN ACCOMPAGNEMENT RÉFLEXIF DES NANOTECHNOLOGIES**
 - 24 8 ■ RECOMMANDATIONS**
 - 28 ANNEXE 1 ■ QUESTION POSÉE PAR LES PRÉSIDENTS DE L'INRA ET DU CIRAD**
 - 30 ANNEXE 2 ■ AVIS EXPRIMÉ PAR GÉRARD TOULOUSE**
 - 31 RÉSUMÉ DE L'AVIS**

INTRODUCTION

Ce nouvel avis du Comité d'éthique Inra-Cirad portant sur les nanosciences et les nanotechnologies aborde une question de politique scientifique, caractéristique de cette époque de l'économie de la connaissance qui n'a pas seulement pour finalité d'articuler différents secteurs de recherche, mais aussi d'inclure la société civile, au double sens du monde économique et des citoyens. Lors d'une conférence à l'Institut Diderot, en janvier 2010, Etienne Klein nous donnait plusieurs raisons de s'intéresser aux enjeux des recherches conduites dans le domaine des nanosciences et, notamment, le fait qu'elles explorent un domaine intermédiaire entre deux mondes, celui de la physique classique dans lequel les objets ont des comportements "raisonnables", et celui de la physique quantique où les objets obéissent à des lois qui semblent défier l'entendement. Ce nouvel espace à découvrir facilite aussi de nouveaux discours en matière de technologies et d'innovations. Le chercheur en nanosciences est avant tout un ingénieur créant des objets dont il étudiera, *a posteriori*, les propriétés émergentes, les effets particuliers liés à l'échelle nanométrique. Les nanotechnologies semblent précéder les nanosciences ! Avec les nanotechnologies, n'assistons-nous pas à un renversement de paradigme scientifique. Autrefois, la science élaborait des modèles et les soumettait à l'expérience. On a désormais le sentiment d'un basculement, l'inversion du rapport entre le faire et le comprendre, le faire précédant le comprendre.

Dans le domaine de l'agriculture et de l'alimentation, le Comité d'éthique a dressé un inventaire des applications avérées et potentielles des nanotechnologies, y compris dans les pays du Sud, tout en identifiant aujourd'hui plusieurs difficultés dans cette démarche, liées à la définition même des produits issus des nanotechnologies, à l'incertitude entourant leurs développements industriels ou à l'insuffisance des cadres réglementaires qui les régissent. S'appuyant sur l'analyse des pratiques à l'Inra et au Cirad, le Comité a souligné le caractère pluridisciplinaire des recherches qui visent notamment à exploiter de nouvelles interfaces, entre sciences physiques et biologiques, entre sciences fondamentales et sciences de l'ingénieur. Il a aussi constaté un important décalage entre le discours que l'on tient à propos des nanotechnologies, ce que l'on en promet ou ce que l'on critique et les pratiques effectives menées par les chercheurs dans les laboratoires. La motivation des chercheurs semble, au premier chef, pragmatique : l'accès à une échelle de grandeur ouvre un éventail de phénomènes et de possibilités à exploiter, qui sont démultipliés par l'existence d'une convergence entre plusieurs secteurs de recherche. Ainsi, les nanotechnologies ne procèdent pas d'une volonté d'obtenir une meilleure représentation de la nature et ne remettent pas en cause directement les catégories qui nous aident à penser le monde, mais celles avec lesquelles nous pensons notre rapport au monde, notre façon d'agir dans le monde, notre mode d'agir technique. Ce contraste entre le "discours fondateur" de ces technologies nouvelles et la pratique des chercheurs, qui empruntent aux approches plus conventionnelles de la chimie, de la physique ou de la biologie les outils de leur mise en œuvre, s'éclaire dès que l'on fait apparaître le rôle joué par les politiques scientifiques de la recherche dans le lancement et le développement des nanotechnologies, ce qui a d'ailleurs contribué à consolider l'unité des recherches à cette échelle.

Sur le volet proprement éthique, la question des risques, du danger potentiel de particules dont les propriétés ne sont pas connues, est très importante. Mais, même en situation d'incertitude, une évaluation éthique ne saurait se réduire à la seule appréciation des risques, sauf à mettre la réflexion éthique sous la coupe de l'expertise scientifique. Un autre inconvénient de s'en tenir à la seule question des risques serait de faire apparaître qu'il n'y a de problème éthique que lorsque les produits entrent dans la société, qu'il n'y aurait pas de problème éthique au sein même du travail de recherche. Ce sont d'ailleurs les chercheurs que nous avons rencontrés qui ont traduit cette question des risques en estimant qu'il fallait diversifier la recherche, que la recherche innovante soit, elle-même, accompagnée d'une recherche toxicologique sur la diversité des risques. En conséquence, pour le Comité d'éthique, il n'y a pas lieu de proposer interdiction ou moratoire sur les nanotechnologies, mais bien d'accompagner les chercheurs dans leur propre réflexion éthique, ce qui implique de donner des références à une éthique de la recherche, à une éthique de la science, inséparables de la responsabilité du chercheur.

L'adoption de cet avis coïncidait avec la publication du communiqué interministériel sur les suites à apporter au débat public relatif au développement et à la régulation des nanotechnologies. Le communiqué reconnaissait que le débat avait souligné qu'au-delà du nécessaire besoin d'information, il y avait une demande de dialogue et de transparence sur les finalités de la recherche et sur les développements technologiques qui en découlent. Le Comité d'éthique est aussi un lieu de dialogue où s'expriment des positions souvent tranchées, parfois contradictoires. L'avis sur les nanotechnologies a fait l'objet d'une expression minoritaire qui apporte un autre regard sur les nanosciences et les nanotechnologies. Le Comité d'éthique est en capacité de faire des recommandations aux directions de l'Inra et du Cirad, ainsi qu'aux chercheurs des deux organismes, signe que l'écoute, l'échange argumenté, la bienveillance réciproque constituent souvent le terreau où se bâtissent les accords.

Les notions de progrès et d'innovation sont au cœur de l'ambivalence qui caractérise les nanotechnologies, puisqu'on innove, puis on se pose la question du progrès. Le progrès renvoie à la finalité, l'innovation au hasard heureux ou malheureux. Or, tout progrès constitue une innovation, mais toute innovation n'est pas un progrès. L'innovation prend une importance grandissante dans l'économie générale de nos sociétés. L'apport original du Comité d'éthique tient aussi à la réflexion approfondie qu'il mène pour comprendre le lien ou l'absence de lien qui existe entre progrès et innovation dans une économie marquée par un flux constant d'innovations, et redonner sens au progrès.

Louis Schweitzer
Président du Comité d'éthique

LE COMITE D'ÉTHIQUE : MISSIONS ET COMPOSITION

Par décision du 31 octobre 2007, le Cirad et l'Inra ont créé un Comité consultatif commun d'éthique pour la recherche agronomique. Ce Comité est placé auprès des Présidents des deux instituts et a une mission de réflexion, de conseil, de sensibilisation et, au besoin, d'alerte.

Il examine les questions éthiques que peuvent soulever l'activité et le processus de recherche, en France et hors de France, dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation, de l'environnement et du développement durable, et notamment celles qui intéressent les relations entre science et société. Le Comité tient compte, en tant que de besoin, des missions et des activités spécifiques des deux instituts, notamment en matière de recherche pour le développement des pays du Sud. Il peut également conseiller les directions générales des deux établissements pour la mise en place de procédures internes nécessaires à l'application de recommandations formulées par d'autres Comités extérieurs institués au plan national, européen ou international, et des réglementations en vigueur relatives à l'exercice de certaines de leurs activités de recherche, en France et hors de France.

Ce Comité commun répond à la logique d'un rapprochement de l'Inra et du Cirad, visant à élaborer une vision partagée des enjeux scientifiques, mondiaux et nationaux, de l'agriculture et de la gestion des ressources vivantes.

Pour l'Inra, ce Comité fait suite au Comepra (Comité d'éthique et de précaution pour les applications de la recherche agronomique), commun à l'Inra et à l'Ifrémer (1998-2007). Pour le Cirad, ce nouveau Comité d'éthique fait suite à celui qui avait été mis en place en 2001 et qui avait achevé son mandat en 2005.

Le Comité est présidé par Monsieur Louis Schweitzer.

Il est composé* de 13 membres :

- Madame Fifi Benaboud, Centre Nord-Sud du Conseil de l'Europe,
- Madame Soraya Duboc, ingénieur agroalimentaire,
- Madame Catherine Larrère, professeur de philosophie (Paris 1),
- Madame Jeanne-Marie Parly, professeur en sciences économiques,
- Monsieur Gilles Boeuf, président du Muséum national d'Histoire naturelle,
- Monsieur Marcel Bursztyn, professeur au Centre pour le développement durable à l'Université de Brasilia,
- Monsieur Claude Chéreau, historien, inspecteur général honoraire de l'agriculture,
- Monsieur Patrick du Jardin, agronome, doyen de l'Université de Gembloux,
- Monsieur Gérard Pascal, nutritionniste, directeur de recherche honoraire,
- Monsieur Lazare Poamé, professeur de philosophie à l'Université de Bouaké et président du Comité consultatif national de Bioéthique (Côte-d'Ivoire),
- Monsieur Gérard Toulouse, directeur de recherche au laboratoire de physique théorique de l'École normale supérieure,
- Monsieur Dominique Vermersch, agronome, professeur d'économie publique et d'éthique, recteur de l'Université catholique de l'Ouest,
- Monsieur Heinz Wismann, philosophe, professeur à l'École des hautes études en sciences sociales.

* Le 13 décembre 2011, le Conseil d'administration a renouvelé pour quatre ans à partir du 1^{er} janvier 2012, le mandat des membres qui avaient achevé leur premier mandat : Louis Schweitzer, Fifi Benaboud, Soraya Duboc, Marcel Bursztyn, Claude Chéreau, Gérard Toulouse, Dominique Vermersch.

LES PRINCIPES ET VALEURS DU COMITÉ D'ÉTHIQUE POUR LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

1• Le Comité commun d'éthique considère la reconnaissance de la dignité humaine comme valeur fondamentale. Il s'attachera dans ses recommandations à en donner une application concrète, mettant en œuvre les droits rappelés dans la Déclaration universelle des droits de l'Homme de 1948.

2• Plus généralement, le Comité considère que les valeurs du corpus de déclarations et conventions édifié depuis plusieurs décennies par l'Organisation des Nations unies et les organisations spécialisées, notamment l'UNESCO, font partie de son cadre de référence, parmi lesquelles la protection et la promotion des expressions culturelles, et la biodiversité. La mise en œuvre de ce corpus passe par des accords internationaux normatifs.

3• Il ne faut pas dégrader l'environnement de vie pour les générations futures et ne pas hypothéquer l'avenir de façon irréparable, notamment en épuisant les ressources naturelles ou en mettant en cause les équilibres naturels. Un tel principe de développement durable impose au Comité de travailler sur le long et le très long terme, et pas seulement sur le court terme. En revanche, le principe d'une réversibilité totale paraît utopique et impraticable.

4• Le monde constitue un système. Toute action sur l'un de ses éléments a des impacts sur d'autres éléments : l'analyse doit alors explorer les effets seconds et induits d'une action et les dynamiques et stratégies qu'elle peut susciter ou favoriser. Les problèmes doivent donc être traités de façon privilégiée à l'échelle mondiale, tout en assurant néanmoins la compatibilité entre le global et le local et en prenant en compte les réalités de terrain.

5• Le Comité considère que la robustesse et l'adaptabilité d'un système sont des éléments positifs. Ainsi, même dans une société ouverte, une certaine autosuffisance dans le domaine alimentaire est souhaitable au niveau national et régional.

6• Le progrès implique une société ouverte aux innovations techniques et sociales, en sachant qu'il faut analyser et prévoir l'impact de ces innovations sur les modes de vie, leur contribution au développement humain, et s'assurer d'un partage équitable des bénéfices qu'elles peuvent apporter.

Les recherches faisant appel aux nanosciences et aux nanotechnologies : quelles questions éthiques dans les champs couverts par l'Inra et le Cirad ?

Les sciences et technologies à l'échelle nanométrique suscitent des débats de nature scientifique, éthique et sociale, que ce soit dans le domaine des matériaux, des technologies de l'information, de la santé, de l'énergie, etc. En ce qui concerne plus particulièrement les domaines de recherche de l'Inra et du Cirad, le Comité d'éthique a dressé un panorama des applications avérées et potentielles des nanotechnologies dans le domaine de l'agriculture et de l'alimentation, y compris dans les pays du Sud, tout en identifiant plusieurs difficultés dans cette démarche, liées à la définition même des nanoproduits, à l'incertitude entourant leurs développements industriels ou à l'insuffisance des cadres réglementaires qui les régissent.

L'originalité des objets des nanotechnologies provient moins de leur taille (de l'ordre du millionième de millimètre) que des effets associés à la dimension nanométrique, effets développant des fonctionnalités particulières que l'on va recruter aux fins de nouvelles applications. À cette échelle, l'imbrication entre savoirs et savoir-faire est telle que la distinction entre nanosciences et nanotechnologies devient artificielle.

Les nanotechnologies sont indissociables de projets politiques fédérateurs et mobilisateurs, avec comme conséquence une projection constante dans le futur, le discours sur les nanotechnologies étant souvent celui de la promesse, critiquable sur le plan éthique. Les nanotechnologies faisant émerger des propriétés inconnues et imprévisibles, la question des risques doit être abordée avec soin. Cependant, la démarche éthique ne se réduit pas à l'appréciation des risques et de leurs conséquences pour l'action. La recommandation du Comité est aussi celle d'une éthique d'accompagnement réflexif du travail des chercheurs qui les invite à développer une nouvelle culture de l'objet.

1 ■ INTRODUCTION

Les Directions générales de l'Inra et du Cirad ont manifesté leur volonté de participer aux débats portant sur les sciences et les technologies à l'échelle nanométrique, en s'intéressant plus particulièrement aux domaines de la recherche finalisée portés par l'Inra et le Cirad, domaines de l'alimentation, de l'agriculture et de l'environnement, avec une attention spéciale à ces questions dans les pays du Sud. Aussi, ont-elles demandé à leur Comité d'éthique commun d'établir un avis sur ces questions (voir annexe 1). Il s'agissait, plus précisément:

- de déterminer le champ conceptuel dans lequel se situent les nanosciences et les nanotechnologies, et de s'interroger sur sa nouveauté,
- de voir si cette originalité est propre aux nanosciences et aux nanotechnologies ou si elles la partagent avec d'autres technologies (biotechnologies, technologies de l'information, sciences cognitives), et, plus précisément, de déterminer le rapport entre biologie synthétique et nanosciences (et technologies),
- de rechercher si les nanosciences et les nanotechnologies posent des problèmes éthiques spécifiques, aussi bien à l'intérieur du domaine de recherche que dans les applications éventuelles,
- tout ceci, afin d'aider la communauté des chercheurs à prendre en considération la dimension éthique et sociale de la recherche sur les nanosciences et les nanotechnologies, tant en interne (rapports entre les chercheurs) qu'en externe (rapport entre science et société).

2 ■ PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES NANOTECHNOLOGIES

¹ On peut citer la définition provisoire du nouveau règlement 1169/2011 du Parlement européen et du Conseil du 25 octobre 2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires, publié le 22 nov. 2011. Cette définition sera reconSIDérée lors de la révision prochaine du règlement (CE) no 258/97 du Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 1997 relatif aux nouveaux aliments et aux nouveaux ingrédients alimentaires: Art.2: "nanomatériaux manufacturé": tout matériau produit intentionnellement présentant une ou plusieurs dimensions de l'ordre de 100 nm ou moins, ou composé de parties fonctionnelles distinctes, soit internes, soit à la surface, dont beaucoup ont une ou plusieurs dimensions de l'ordre de 100 nm ou moins, y compris des structures, des agglomérats ou des agrégats qui peuvent avoir une taille supérieure à 100 nm mais qui conservent des propriétés typiques de la nano-échelle.

Les propriétés typiques de la nano-échelle comprennent:

- i) les propriétés liées à la grande surface spécifique des matériaux considérés; et/ou
- ii) des propriétés physico-chimiques spécifiques qui sont différentes de celles de la forme non nanotechnologique du même matériau.

² Kreyling W. G. (2010). A complementary definition of nanomaterial. Nano Today, 5: 165-168.

Rapport du SCENIHR (The Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks) du 29 November 2007, Opinion on the scientific aspects of the existing and proposed definitions relation to products of nanoscience and nanotechnologies, (http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihr/docs/scenihr_o_012.pdf)

Il existe un décalage important entre le discours tenu à propos des nanotechnologies (ce que l'on en annonce, ce que l'on en promet ou la critique radicale qui en est faite) et les pratiques effectives menées par les chercheurs dans leurs laboratoires. Ce décalage est tel qu'il arrive que les chercheurs ne reconnaissent en rien le travail qu'ils sont en train de mener dans la présentation qui est faite des nanotechnologies, tant pour le grand public que pour l'ensemble de la communauté de la recherche. Le présent avis a donc pour objectif de cerner les raisons de ce décalage, de trouver une définition des nanotechnologies qui permette aux chercheurs de se repérer et de situer leur travail dans un cadre général qui peut être pour eux à la fois extérieur (ils ne l'ont pas défini) et contraignant (c'est à partir de ce cadre que sont lancés les appels à projets et définies les directives de recherche qui orientent leur travail). L'hypothèse avancée dans cet avis est que ce cadre général est celui de la définition d'une politique de programmation de la recherche, déclinée à différents niveaux nationaux et régionaux, qui en fixe les étapes et y associe l'ensemble de la société.

2•1 DÉFINITIONS ET DIFFICULTÉS ASSOCIÉES

Les termes de nanoscience(s) et de nanotechnologie(s) se réfèrent à la dimension des objets qu'elles étudient, manipulent ou produisent: l'échelle "nano", c'est-à-dire celle du millionième de millimètre (10^{-9} mètre). Pour autant, les nano-objets dont il est question ne peuvent être définis par leur seule dimension, puisque la matière est naturellement organisée à l'échelle nanométrique, qui est celle des molécules et assemblages de molécules. L'objectif des nanotechnologies est d'intervenir à cette échelle, et d'y faire apparaître des propriétés nouvelles. Aussi, les tentatives de définition, qu'elles émanent du monde scientifique ou des textes légaux ¹, évitent-elles de ne recourir qu'à des valeurs seuils pour qualifier les nanomatériaux, pour mettre en avant les caractéristiques particulières associées aux très petites dimensions. En effet, à une échelle de l'ordre de 100 nm et en deçà, les nano-objets présentent des rapports surface/volume élevés, manifestent des effets quantiques inobservables aux tailles supérieures, expriment des interactions inédites entre eux ou avec les matériaux de leur environnement (agglomération, agrégation, coalescence ²), développent des propriétés particulières de solubilité, de mobilité, entraînant des ions et molécules dont ils constituent de nouveaux vecteurs.

L'originalité des objets des nanotechnologies se trouve dans les effets particuliers associés à leur dimension nanométrique, et non dans leur seule dimension ou échelle. Les nanotechnologies visent à produire des objets dont on étudie les effets particuliers liés à leur nano-échelle. Ces effets développent des fonctionnalités particulières, que l'homme recrute aux fins de nouvelles interactions avec son environnement. Les nanotechnologies s'intéressent ainsi à des objets-effets définis par leurs interactions avec leur milieu, plus que par leur existence indépendante.

Les effets liés à l'échelle nanométrique sont multiples et largement imprévisibles. Ils expliquent pourquoi évaluateurs et gestionnaires des risques renoncent à définir trop étroitement les nano-objets à réglementer : la taille "nano" en tant que telle importe peu et, du fait de ses conséquences imprévisibles, il est justifié d'examiner les nano-objets au cas par cas, au regard des applications particulières qui les mobilisent (nanofiltration, vectorisation de médicaments, emballages "intelligents", etc).

Ces propriétés se manifestent d'ailleurs quelle que soit l'origine des nano-objets : nano-objets naturels ou artificiels et, au sein des nano-objets artificiels, ceux libérés non intentionnellement par les activités humaines (comme des nanoparticules issues de la combustion d'hydrocarbures) et ceux produits à dessein et que l'on nomme "nanomatériaux manufacturés". Si l'homme fréquente et utilise des nanomatériaux depuis très longtemps - certaines industries comme celles du verre et de la sidérurgie exploitant de façon empirique les propriétés particulières des nanomatériaux - il n'en demeure pas moins que nanosciences et nanotechnologies sont nées de notre capacité à observer les nanostructures à l'échelle atomique et, surtout, à organiser la matière à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire à modifier et à créer des formes nanométriques. Les développements techniques récents que sont le microscope à effet tunnel et le microscope à force atomique ont en effet permis, initialement³ à Gerd Binnig et Heinrich Rohrer du laboratoire IBM de Zürich au début des années 80, d'observer chaque atome à la surface d'un objet, mais surtout de déplacer ces atomes en exploitant leurs énergies de surface. Au-delà d'outils d'observation, ces microscopes deviennent des nano-manipulateurs qui permettent d'assembler des nano-objets.

Cette démarche, qualifiée d'ascendante (*bottom up*), est souvent distinguée d'une approche essentiellement descendante (*top down*), qui procède plutôt par miniaturisation. Mais celle-ci, à partir d'une certaine échelle, peut rencontrer des propriétés quantiques et l'hyperfractionnement de la matière conduit à des effets inattendus exploités *a posteriori*. Les deux approches, ascendante et descendante, opèrent donc toutes deux dans le monde nouveau des nanosciences et nanotechnologies, leur démarche commune consistant à étudier et exploiter les fonctions particulières des nanostructures.

Ces deux approches sont cependant inégalement perçues par les chercheurs et les observateurs. L'approche ascendante fascine : elle est perçue comme une rupture technologique majeure qui semble consacrer la domination de l'homme sur la matière, jusqu'à ses structures les plus intimes. Le discours général sur les nanotechnologies semble captif de cette fascination, alors que la pratique des nanotechnologies - il suffit de consulter les articles publiés dans les revues scientifiques du domaine - repose davantage sur les approches éprouvées de la chimie de synthèse, de la chimie des polymères, du génie enzymatique ou de la biologie moléculaire. On n'assemble pas (ou peu) un nanomatériau molécule par molécule, mais on pilote ses conditions de synthèse pour obtenir des populations de molécules aux structures et fonctions recherchées⁴. Le chimiste organicien est coutumier du fait, notamment lorsqu'il travaille sur des molécules dites "chirales", c'est-à-dire présentant deux configurations qui sont comme deux images spéculaires de la même molécule. Ces configurations peuvent présenter des activités biologiques très différentes, voire antagonistes. Lorsqu'il s'agit de médicaments, ceux-ci doivent être "chiralement purs", ce qui impose au chimiste la maîtrise des nanoformes qu'il produit. Comme pour les nanomatériaux manufacturés, on reconnaît donc que la nanostructure moléculaire est porteuse d'informations et de fonctions propres, que l'on cherche à maîtriser.

Il y a donc un contraste paradoxal entre le "discours fondateur" de ces technologies nouvelles et la pratique des chercheurs, qui empruntent aux approches plus conventionnelles de la chimie, de la physique ou de la

³ On rappellera cependant la vision quasi prophétique du physicien Richard Feynman qui, dès 1959, préfigurait les nanotechnologies dans une conférence célèbre à l'*American Physical Society*, intitulée *There's plenty of room at the bottom*. Sans prononcer une fois les mots nanosciences ou nanotechnologies, il y explorait les possibles ouverts par la maîtrise de l'organisation atomique de la matière et disait notamment : "But I am not afraid to consider the final questions as to whether, ultimately - in the great future - we can arrange the atoms the way we want; the very atoms, all the way down! (...) I can't see exactly what would happen, but I can hardly doubt that when we have some control of the arrangements of things on a small scale, we will get an enormously greater range of possible properties that substances can have, and of different things that we can do."

⁴ Dans le contexte des nanotechnologies, ce pilotage s'inspire souvent des cellules vivantes et "domestique" certains de ses acteurs moléculaires, notamment les enzymes. Beaucoup de processus nanotechnologiques sont ainsi "bioinspirés".

biologie les outils de sa mise en œuvre, paradoxe que l'on retrouve sous une autre forme dans l'opposition entre un discours des promesses (les "nano" futuristes et "hype") et la réalité de ce qui se fait. Ces paradoxes s'éclairent dès que l'on fait apparaître le rôle qu'ont joué les politiques scientifiques de la recherche dans le lancement et le développement des nanotechnologies. Quelques dates jalonnent ces politiques. En 1999, le Président Clinton a annoncé le lancement de la *National Nanotechnology Initiative* (NNI). Celle-ci devient la structure de l'administration fédérale en charge de la coordination des activités étiquetées "nanotechnologies" des différentes agences. Dirigée par Mihail Roco, elle est dotée d'un financement régulier⁵. En 2004, les Européens lancent "un plan d'action stratégique" en faveur des technologies, qui figure comme un élément majeur de la stratégie de Lisbonne, visant à faire de l'Europe, une "société de la connaissance". Ce plan est relayé dans les différents pays européens : en France, lors de la création de l'Agence nationale de la recherche (ANR), en 2005, les nanotechnologies apparaissent rapidement comme un domaine prioritaire.

C'est donc l'émergence de ces programmes scientifiques qui a consolidé l'unité de recherches qui, considérées séparément, peuvent paraître relever de domaines et de pratiques scientifiques différents. Mihail Roco en définit ainsi la portée⁶ : "La nanotechnologie désigne la capacité de comprendre, maîtriser et manipuler la matière au niveau d'atomes individuels et de molécules individuelles, ainsi qu'au niveau "supramoléculaire" impliquant des assemblages de molécules. Son but est de créer des matériaux, des dispositifs et des systèmes pourvus de propriétés et de fonctions essentiellement nouvelles en raison de leur petite structure". C'est également Mihail Roco qui introduit une distinction (reprise par de nombreuses administrations scientifiques) en quatre "générations" de nanotechnologies :

- (a) Nanoproduits de première génération, **nanostructures passives**, illustrées par les nanofilms (revêtements, peintures) et les nanoparticules (métaux et polymères, céramique, etc.), principalement dans l'industrie cosmétique et de la peinture.
- (b) Nanoproduits de deuxième génération, **nanostructures actives**, illustrées par de nouveaux transistors, des vecteurs de médicaments, des biosenseurs, principalement en électronique et en médecine, les nanostructures étant qualifiées d'actives dans la mesure où elles fournissent une action ou une information en interagissant avec leur environnement.
- (c) Nanoproduits de troisième génération, **nanosystèmes 3-D et systèmes de nanosystèmes**, issus de différentes techniques de synthèse et d'assemblage, dont l'autoassemblage et le bioassemblage ; les nanoréseaux développent d'éventuelles architectures multi-échelles, produisant des tissus et des systèmes sensoriels artificiels, des nanorobots, nanomachines solaires, etc.
- (d) Nanoproduits de quatrième génération, **nanosystèmes moléculaires hétérogènes**, où chaque molécule au sein du nanosystème possède une structure propre et joue un rôle défini. Les molécules sont des machines et des outils, et, de l'ingénierie de leurs structures et de leurs architectures, émergent des fonctions radicalement nouvelles. Il s'agit d'approcher la façon de fonctionner des systèmes biologiques, de produire comme eux des émergences fonctionnelles, mais en s'affranchissant de contraintes et de stratégies propres au fonctionnement du vivant : (i) en se déployant dans des milieux différents - les systèmes biologiques opèrent toujours dans de l'eau ou des membranes lipidiques -, (ii) en utilisant d'autres modes de transmission de l'information - les systèmes biologiques traitent l'information avec une relative lenteur, comme celle d'un signal électrique le long de cellules nerveuses humaines ou de molécules hormonales circulant dans les sèves des plantes -, (iii) en adoptant des techniques d'assemblage qui se distinguent des modes opératoires cellulaires - comme la réplication semi-conservative de l'ADN, la synthèse des protéines par lecture d'instructions portées de l'ARN - notamment en façonnant les nanostructures atome par atome, molécule par molécule, (iv) en exploitant de nouveaux rapports, notamment quantiques, entre matière et énergie.

⁵ 1,5 milliard de dollars en 2009.

⁶ Roco M. (2004). Nanoscale science and engineering: unifying and transforming tools. *AIChE Journal*, 50: 890-897.

⁷ Il ressort des échanges avec les chercheurs de l'Inra et du Cirad qu'ils se retrouvent peu dans ces catégories, voire y reconnaissent une source d'incompréhension potentielle.

Ces distinctions n'ont pas vocation à décrire la réalité des nanotechnologies (elles portent très largement sur le futur), mais contribuent à la faire exister, en définissant une logique pour les appels à projets⁷. Ce que l'on désigne comme "nanotechnologies" trouve son unité dans une politique scientifique en voie de constitution, qui associe des pratiques scientifiques de laboratoire et des mécanismes d'orientation de la recherche, par le biais de programmations successives. Le contenu peut en varier suivant les pays. Les États-Unis ont beaucoup

insisté sur la convergence de plusieurs domaines technologiques, souvent désignée par l'acronyme NBIC⁸, ce qui est à la fois le constat d'un état de fait, et un programme ambitieux officiellement promu aux États-Unis, qui vise à rien moins que l'unification des sciences et l'accroissement des performances humaines, grâce à des effets de synergie entre les quatre composantes.

En Europe, si les technologies convergentes sont également appelées à "façonner l'avenir des sociétés européennes", selon le titre du rapport Nordmann de 2005⁹, ce rapport fait preuve de plus de réserve en se limitant à un exercice de prospective technologique, mettant en lumière les contributions possibles des technologies convergentes à l'amélioration de la santé, de la qualité de vie et de l'environnement. Une convergence au service de l'humain, sans prétendre en altérer les propriétés, ni promouvoir de nouveaux hybrides avec ses artefacts technologiques. Le rapport propose une approche européenne des technologies convergentes baptisée TCSCE: "Technologies convergentes pour la Société de la connaissance européenne".

Ces visions globales de politiques scientifiques orientées vers le progrès peuvent paraître très loin des préoccupations des chercheurs et de leur travail scientifique quotidien. Ils en participent cependant, ne serait-ce qu'en répondant à des appels d'offres, et, en tant que citoyens, ils sont impliqués dans un projet scientifique conçu comme une politique d'ensemble visant à transformer la société en l'associant tout entière à un projet de développement et aux conséquences de celui-ci. Les nanotechnologies, comme politique scientifique, ne se bornent pas à coordonner des activités scientifiques en cours et à en impulser de nouvelles, elles incluent également une dimension sociétale, et associent à leur projet les sciences humaines et sociales (une partie du budget leur est consacrée par la NNI). Il s'agit donc d'étudier les implications sociétales des nanotechnologies: ce sont les programmes ELSA¹⁰ ou ELSI¹¹, ou de lancer des débats publics (comme il a été tenté en France, en 2009). Une évaluation éthique des nanotechnologies doit donc prendre en compte ces aspects.

2•2 QUEL LIEN ENTRE NANOTECHNOLOGIES ET BIOLOGIE SYNTHÉTIQUE ?

On vient de le voir, les nanotechnologies annoncent l'avènement de nanosystèmes complexes manufacturés, or c'est aussi l'une des ambitions de la biologie synthétique, une biologie qui prétend, ultimement, construire des organismes vivants *de novo*, usines cellulaires soumises à la conception rigoureuse de l'ingénieur et optimisées en vue de la réalisation de ses objectifs instrumentaux¹². Dans son approche *bottom up*, on peut d'ailleurs assimiler la biologie synthétique à un faisceau de technologies développant des modes particuliers d'assemblage de nanosystèmes complexes, issus de la biologie moléculaire. Relativement à d'autres méthodes de nanoconstruction, son originalité tiendrait à l'utilisation des supports informationnels propres aux systèmes vivants (comme le codage par des acides nucléiques), ainsi que de leurs capacités d'auto-répli-
cation et d'auto-assemblage.

Quels autres points communs entre biologie synthétique et nanotechnologies ?

Les deux domaines de recherche sont récents et soumis à une grande incertitude quant aux finalités: qualifiées de technologies "capacitantes" (*enabling technologies*), elles se définissent par de nouvelles capacités d'action, mais sont intrinsèquement dénuées de projets. À l'incertitude scientifique liée aux risques s'ajoute donc une "incertitude stratégique", source de questionnement éthique selon Goorden *et al.* (2008)¹³. Les deux technologies posent donc des questions communes de gouvernance de la recherche. De plus, elles soulèvent des questions non résolues de définition, qu'il faut attribuer au fait que c'est la démarche, plus que l'objet, qui définit ces disciplines. La biologie synthétique produit l'objet qu'elle étudie, par une contraction du faire et du savoir qui caractérise également les nanotechnologies. Autre analogie, l'originalité de la biologie synthétique tient à une démarche "ascendante" (*bottom up*) qui consiste à assembler, pièce par pièce ("biobrique par biobrique", dit-on dans le domaine) un système cellulaire auto-répliquatif ("vivant"), grâce au répertoire étendu des éléments fonctionnels d'ADN que la science génomique a mis à sa disposition. On y définit également une démarche "descendante" (*top down*), qui consiste à dépouiller progressivement un

⁸ Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science.

⁹ Commission européenne. Technologies convergentes - Façonner l'avenir des sociétés européennes, rapport du Groupe d'experts Foresighting the New Technology Wave, 2005, 64 p.

¹⁰ Ethical, legal and societal aspects.

¹¹ Ethical, legal and societal implications.

¹² European Group on Ethics in Science and New Technologies to the European Commission - Ethics of Synthetic Biology, Opinion n° 25, November 2009, doi: 10.2796/10789; Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues, 2010, New Directions - The Ethics of Synthetic Biology and Emerging Technologies, www.bioethics.gov.

¹³ Goorden L., Van Oudheusden M., Evers J. and Deblonde M. (2008). Nanotechnologies for tomorrow's Society: A case for reflective action research in Flanders, Belgium in: *The Yearbook of Nanotechnology in Society*, Volume 1: 163-182, Arizona State University.

génome de portions de son ADN, pour tendre vers un "génome minimal" qui identifierait les conditions ultimes du vivant. Quelle rupture technologique (pour les nanotechnologies, il y avait notamment le microscope à effet tunnel) ? Une capacité étendue à synthétiser de très longues molécules d'ADN et à assembler des génomes entiers dans des cellules receveuses. La longueur maximale des ADN néosynthétisés a augmenté exponentiellement au cours des années récentes, ouvrant la voie à la biologie synthétique, alors que gonflait rapidement le volume d'informations sur les gènes et les génomes grâce aux progrès du séquençage. La biologie synthétique se nourrit également de la biologie "systémique", qui vise à décrire les systèmes biologiques complexes en intégrant les masses de données produites par les technologies dites "à haut débit" (de type "omics") et en modélisant le fonctionnement des réseaux cellulaires sur cette base.

Comme les nanotechnologies, la biologie synthétique poursuit un double objectif de connaissance et d'application. Dans sa dimension cognitive, elle étudie le fonctionnement des systèmes vivants, compris comme des réseaux de gènes et de protéines, en re-construisant de tels réseaux dans des cellules receveuses, mettant à l'épreuve ses hypothèses et ses modèles. Dans sa dimension appliquée, elle conçoit et assemble des réseaux génétiques et métaboliques à la façon d'un ingénieur, guidé par des principes d'efficacité et de rendement et faisant appel à des notions de standardisation et d'abstraction. Le système vivant artificiel est conçu comme un réseau d'interactions ouvert sur son environnement, mais contraint par la réalisation d'une tâche pré-définie : produire de l'hydrogène grâce à l'énergie lumineuse, dégrader un polluant organique, signaler la présence d'un agent pathogène, délivrer un médicament dans une cellule cible, etc.

Comme les nanotechnologies, la biologie synthétique est partagée entre la re-production de systèmes vivants (testant les fonctions de génomes entiers par leur re-construction et leur installation dans des cellules d'accueil) et la conception de nouveaux systèmes (le *design* de nouvelles formes de vie).

Comme pour les nanotechnologies, cette approche ascendante paraît fondamentalement ambivalente, et par là, source de questionnement éthique : la production d'effets recherchés est mêlée à la curiosité de découvrir des effets imprévisibles, émergences caractérisant le vivant et sur lesquelles le biologiste peut, enfin, expérimenter.

Pour autant, les liens et analogies entre nanotechnologies et biologie synthétique ne permettent pas de conclure que ce nouveau domaine de recherche ne suscite pas des questions éthiques spécifiques. En conséquence, le présent avis ne peut prétendre traiter de l'éthique de la biologie synthétique, même s'il peut sans doute contribuer à la réflexion dans ce domaine.

2•3 PROPOSITIONS

De la présentation précédente, se dégagent trois propositions sur les termes employés et les définitions données :

(a) La distinction entre nanosciences et nanotechnologies est assez artificielle, dès lors que l'objet de l'étude est en même temps l'objet d'une maîtrise à finalité d'application, dès lors aussi que certains de ces nano-objets sont à la fois produits au laboratoire pour être ensuite étudiés au laboratoire (les "nano" créent leurs propres objets d'étude ; ils n'étudient pas un "donné"). Nous proposons donc de parler de nanotechnologies (au pluriel).

(b) Dans le champ des nanotechnologies, la démarche des chercheurs se manifeste non seulement à travers l'observation d'objets nouvellement créés, mais aussi dans une approche systémique pluridisciplinaire, qui situe les sources de propriétés émergentes aux interfaces disciplinaires. Il y a une profonde continuité, au sein des sciences et des technologies, dans le processus de miniaturisation, depuis plusieurs décennies. La convergence qui existe entre les disciplines fondamentales (physique, chimie, biologie), dans le domaine nanométrique, est facilitée justement par le fait que l'on s'adresse à une échelle "infiniment petite", constituant vraisemblablement une limite dans l'expérimentation.

(c) L'unité des nanotechnologies n'est cependant pas celle d'un champ scientifique original, ni même de technologies transversales à plusieurs disciplines scientifiques, mais leur unité s'appréhende à l'échelle d'une

politique scientifique, d'un énoncé unique liant une lecture du passé et une vision du futur. La politique scientifique des nanotechnologies est caractéristique de l'époque de l'économie de la connaissance (partenariat avec l'industrie) et de la "cité par projets". Ces politiques n'ont pas seulement pour finalité d'articuler différents secteurs de recherche, mais aussi d'inclure la société civile, au double sens du monde économique et des citoyens ordinaires (dont la participation au débat public est prévue). Les nanotechnologies sont alors envisagées au sein d'une politique globale qui vise à transformer la société en l'associant tout entière à un projet de développement et aux conséquences de celui-ci.

L'originalité des nanotechnologies peut ainsi être appréhendée sous un double aspect:

- celui qui mêle nanosciences et nanotechnologies dans une même pratique de "domestication de la matière" (vue comme la découverte et l'utilisation des potentialités cryptiques de la matière à l'échelle "nano"),
- celui qui consiste en un projet de développement global (comme l'"amélioration des performances humaines" du projet NBIC ou la "Société de la connaissance européenne" promue par la Commission européenne) et inscrit les nanotechnologies dans des finalités qui dépassent les applications techniques circonscrites.

3 ■ APPLICATIONS DANS LE DOMAINE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION (AVÉRÉES ET POTENTIELLES)

3•1 MIEUX COMPRENDRE LES APPLICATIONS ACTUELLES ET POTENTIELLES DES NANOTECHNOLOGIES À L'ALIMENTATION ET À L'AGRICULTURE

Plusieurs rapports d'organisations internationales et publications scientifiques permettent de décrire le paysage des applications alimentaires et agronomiques¹⁴. Ces publications peuvent être complétées par plusieurs sites web. La banque¹⁵ des données du Project on Emerging Nanotechnologies, développée par le Woodrow Wilson International Center for Scholars et le Pew Charitable Trusts, représente sans doute l'initiative la plus ambitieuse, visant un inventaire mondial des applications commerciales des nanotechnologies ("nanotechnology-enabled products"). Cet inventaire présente la particularité d'être alimenté pour l'essentiel par les déclarations des industriels sur internet, selon les termes des auteurs de la banque de données: "*the Project on Emerging nanotechnologies (PEN) consumer products inventory includes products that have been identified by their manufacturer or a credible source as being nanotechnology-based. This update identifies products that were previously sold, but which may no longer be available. It remains the most comprehensive and widely used source of information on nanotechnology-enabled consumer products in the world*". Démarré en 2006, cet inventaire totalise aujourd'hui¹⁶ plus de 1 300 produits, dans tous les domaines d'application: réfrigérateurs anti-bactériens et anti-odeurs grâce au revêtement intérieur de nanoparticules d'argent, cocktails vitaminiques nano-encapsulés pour sportifs, purificateurs d'air domestique par activité photocatalytique du nano-argent, revêtements anticorrosifs développés par les technologies nanocéramiques, etc.

D'autres sources d'informations peuvent être citées: celle du *Nanotechnology Product Directory* (www.nanoshop.com) et celle du *Nanoforum*, initiative européenne d'échange d'informations sur les nanotechnologies (www.nanoforum.org)¹⁷. Dans tous les cas, l'information est largement fondée sur la volonté commerciale de l'entreprise à communiquer sur l'originalité du produit et sur la contribution des nanotechnologies à son développement.

Dans un avenir proche, l'autorisation de mise sur le marché européen conditionnée par une évaluation positive des risques par l'Autorité européenne de Sécurité des Aliments (EFSA, pour *European Food Safety Authority*) devrait ouvrir la voie à un enregistrement plus rigoureux des produits destinés au marché de l'alimentation. Dans cette perspective, le Comité scientifique de l'EFSA a publié en 2009 un premier rapport¹⁸ relatif aux risques potentiels des nanotechnologies dans l'alimentation humaine et animale. À la suite de ce premier rapport, un document d'orientation sur les principes et méthodes d'évaluation des risques liés aux

¹⁴ Nous recommandons Bouwmeester *et al.* (2009) et références citées: Bouwmeester H. *et al.* (2009). Review of health safety aspects of nanotechnologies in food production. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 53: 52-62; van Zijverden et Sips (2009); Van Zijverden M. et Sips A.J.A.M. (2009). Nanotechnology in perspective. Risks to man and the environment. RIVM Report 601785003/2009; FAO/WHO (2009); FAO/WHO (2009). Expert meeting on the applications of nanotechnologies in the Food and Agriculture Sectors: Potential Food Safety Implications. Meeting Report. Rome, 104pp; Chaudry Q. (2008); Chaudry Q. (2008). Applications and implications of nanotechnologies for the food sector. *Food Additives and Contaminants*, 25: 241-258; enfin les actes d'un Colloque international à Bruxelles en Novembre 2010: Huyghebaert A., Van Huffel X, Houins G. (2010). Nanotechnology in the Food Chain: Opportunities and Risks. Brussels, November 24th 2010, 138pp.

¹⁵ <http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/>

¹⁶ Février 2012.

¹⁷ Dont un rapport sur *Nanotechnology in agriculture and food*.

¹⁸ EFSA,Scientific Committee (2009). The potential risks arising from nanoscience and nanotechnologies on food and feed safety (EFSA-Q-2007-124a). *The EFSA Journal* 958: 1-39. http://www.efsa.europa.eu/fr/scdocs/doc/sc_op_ej958_nano_en_0.pdf

applications des nanosciences et nanotechnologies à l'alimentation humaine et animale (incluant les additifs alimentaires, les enzymes, les arômes, les matériaux au contact des aliments, les nouveaux aliments et les pesticides) a été élaboré, ce qui a impliqué la consultation des autorités compétentes des États membres, des parties prenantes et du public sur un projet de texte. Au terme de ce travail et après adoption et publication le 10 mai 2011 de ce document par l'EFSA¹⁹, les industries disposent désormais d'instructions relatives aux données attendues en matière d'évaluation des risques, préalables à l'autorisation de mise sur le marché, et à la constitution des dossiers de demande d'autorisation, et partant, à la transparence de leur démarche de mise sur le marché. Malgré la lourdeur de cette procédure menée par l'EFSA, elle nous paraît indispensable et devant être soutenue par les scientifiques de l'Inra et du Cirad, sollicités en tant qu'experts dans les comités *ad hoc* de l'Autorité européenne, d'autant plus que l'EFSA reconnaît les incertitudes sur la pertinence de certaines méthodologies de test et s'engage à réviser ce guide pratique chaque fois que nécessaire, tenant ainsi compte du développement rapide des évaluations des risques liés aux nanomatériaux manufacturés. Dans cet effort, l'EFSA s'efforce de tenir compte de l'ensemble des initiatives internationales et nationales en matière d'évaluation des risques²⁰.

Les innovations nanotechnologiques peuvent être décrites en termes de catégories d'applications (par exemple: emballage alimentaire, détection d'allergènes alimentaires) ou de catégories de produits (par exemple: polymères composites contenant du nano-argile, laboratoire-sur-puce²¹). Nous présentons quelques applications et produits selon l'ordre suivant: production végétale, transformation et modification des aliments, emballage et conservation des aliments, historique et traçage des aliments. Nous renvoyons aux publications mentionnées plus haut et aux références citées pour les approfondissements souhaités sur ce volet plus technique.

3.1.1 Production végétale

Un petit nombre d'intrants agricoles, engrains et pesticides, exploitent les nanotechnologies pour développer de nouvelles matières actives et formulations, dans le but de mieux cibler l'application, de maîtriser les doses, de favoriser le relargage progressif des substances actives, leur prélèvement par les organismes cibles et leur mobilité dans ceux-ci, afin également de nano-encapsuler des groupes de substances actives et d'en favoriser les synergies. Les potentialités apparaissent importantes, mais le secteur de la production agronomique utilise peu une technologie qui développe ses concepts et ses techniques principalement dans les secteurs de la santé, de l'informatique et de l'énergie. Quelques fertilisants contiendraient des micronutriments nanostructurés (oxydes et carbonates de zinc, calcium, magnésium, molybdène, sulfates de fer, cobalt, aluminium, etc.). Les produits issus de nanotechnologies offrent également des potentialités en vue de la décontamination des sols, au moyen notamment de poudre ultrafine de fer nanostructuré (Tiju et Morrison, 2006)²².

Un autre secteur d'application important concerne l'assainissement des eaux par nanofiltration, exploitant notamment des filtres à nanofibres d'oxyde d'aluminium éliminant jusqu'au plus petit agent biologique, ou à nanoparticules de lanthane absorbant les phosphates en solution dans les eaux, réduisant ainsi l'eutrophisation et les proliférations d'algues associées à ce phénomène dommageable pour la santé et l'environnement (Tiju et Morrison, 2006).

L'agriculture dite "de précision" vise à optimiser la productivité végétale en adaptant le traitement des plantes et des sols - application d'engrais et pesticides, travail du sol, irrigation et drainage, etc. - aux variations locales et temporelles des besoins des plantes sur la parcelle agricole. Elle nécessite la mesure de multiples variables biologiques et environnementales, la transmission et l'intégration des données dans des modèles d'élaboration du rendement qui optimisent la production en réduisant les coûts économiques et écologiques. Le recours à des dispositifs de mesure miniaturisés, distribués sur l'ensemble de la surface cultivée, reliés à des systèmes de positionnement satellitaire et qui renseignent en temps réel sur l'activité des végétaux cultivés, sur l'état du sol et des supports de production (stocks hydriques et minéraux), ainsi que sur les risques sanitaires (présence d'agents infectieux et conditions environnementales favorables à leur

¹⁹ EFSA Scientific Committee.2011. Scientific Opinion on Guidance on the risk assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain. EFSA Journal, 9(5):2140 [36 pp.] doi:10.2903/j.efsa.2011.2140.

²⁰ Galli C. and Carlander D. (2010). Risk assessment - EFSA's point of view - The potential risks arising from nanoscience and nanotechnologies on food and feed safety, in Huyghebaert A., Van Huffel X., Houins G. (eds.) Nanotechnology in the Food Chain: Opportunities and Risks, 71-75, Brussels.

²¹ Ou "lab-on-a-chip", qui désigne une plateforme de biosenseurs nanométriques.

²² Tiju J. and Morrison M. (2006). Nanotechnology in Agriculture and Food - A nanoforum report. (<http://www.nanoforum.org>).

développement), devrait contribuer à la mise en œuvre de cette agriculture de précision. Les nanotechnologies ("nanotechnology-enabled devices"), par le développement de nano-senseurs et de réseaux de transmission de données sans fil offrent des opportunités considérables à ce niveau. Elles proposent également des systèmes de relargage ciblé et progressif de substances bioactives sur les cultures, indispensables aux fins de cette agriculture de précision, dont le concept, élaboré il y a plus de vingt ans, tarde à se traduire dans la pratique, faute des dispositifs techniques efficaces et économiquement justifiés.

3.1.2 Transformation et modification des aliments

Les produits et procédés issus des nanotechnologies devraient permettre de modifier les qualités nutritionnelles et fonctionnelles des aliments, mais les allégations des fabricants relatives aux produits sur les marchés sont actuellement peu étayées, et on peut attendre un rôle accru des autorités d'évaluation et de contrôle à ce niveau. En particulier, l'EFSA a pour objectif d'étendre ses missions d'évaluation des aliments en Europe à celle des bénéfices pour la santé des consommateurs, au-delà de la question des risques, ce qui devrait clarifier les effets attendus des nouveaux aliments, additifs et suppléments alimentaires, à relativement court terme, incluant ceux développés par nanotechnologies²³. Parmi les applications prometteuses des nanotechnologies à l'alimentation, les systèmes de nano-formulation de substances bioactives, permettant leur adressage ciblé dans l'organisme et augmentant leur biodisponibilité, sont mis en avant (Bouwmeester *et al.* 2009)²⁴. Par exemple, différents systèmes de nano-encapsulation de nutriments et micronutriments, facteurs antimicrobiens et arômes, s'inspirant du secteur pharmaceutique, mais innovant par le développement de nano-structures dérivées de lipides et de polymères naturels (polysaccharidiques et protéiques), augmenteraient la stabilité des substances bioactives dans le système digestif et rendraient plus efficace leur administration orale, donc leur utilisation alimentaire. Une description détaillée et une nomenclature de ces nano-formulations (nanoliposomes, archaeosomes, nanocochléates, micelles, nanosphères, nanocapsules, polymersomes, etc. !) peut être trouvée chez Bouwmeester *et al.* (2009).

Concernant la transformation des aliments, c'est la protection antimicrobienne par l'utilisation de filtres (par exemple, nano-céramiques) et de revêtements nano-structurés (par exemple, argent nanoparticulaire) qui constitue le débouché majeur des nanotechnologies à ce niveau, tel qu'on peut se le représenter aujourd'hui.

3.1.3 Emballage et conservation des aliments

Les emballages alimentaires utilisent des nanoparticules et des nanomatériaux composites afin de moduler et de renforcer leurs propriétés de perméabilité chimique, microbiologique et thermique, d'augmenter leur résistance et leur durée de vie, permettant du même coup une réduction d'épaisseur et de masse, de repousser les aérosols et les poussières, de séquestrer l'oxygène, freinant par ces effets la détérioration du produit. Ainsi, des polymères plastiques intègrent des argiles nano-structurées afin de réduire la perméabilité aux gaz, des nanoparticules d'argent et d'oxyde de zinc protègent contre les microorganismes pathogènes, des nanoparticules de dioxyde de titane filtrent les rayonnements ultra-violets, du nitrate de titane nano-structuré augmente la résistance mécanique, un revêtement à base de nano-silice développe une surface hydrophobe, donc à faible mouillabilité, etc. C'est au niveau des emballages dits "intelligents" que les nanotechnologies semblent innover le plus. On qualifie - un peu vite sans doute - "d'intelligent" un matériau dont les propriétés (optiques, magnétiques, chimiques, etc.) sont modifiées par un stimulus de l'environnement, lui permettant de réagir aux conditions du milieu ou d'informer un observateur ou un dispositif de régulation. Cette technologie utilise des nanocapteurs, incorporés à l'emballage ou posés en surface, qui permettent de détecter des variations de température ou d'humidité des produits stockés, ou encore des substances issues de la dégradation ou de la contamination microbiologique de la denrée alimentaire. Cette technique est également appliquée à la protection directe des denrées, en appliquant les nanocapteurs à leur surface ou en les y intégrant. À titre d'exemple, une firme a développé un "spray de détection" de contaminants bactériens (salmonelles et colibacilles), déposant à la surface de l'aliment un film contenant des nanocapteurs bioluminescents²⁵.

²³ EFSA Scientific Committee 2010. Guidance on human health risk-benefit assessment of food. *EFSA Journal*, 8(7):1673 [41 pp.]. doi:10.20933/efsa.2010.1673. Disponible en ligne: www.efsa.europa.eu

²⁴ Voir 14.

²⁵ Une protéine hybride a été créée en laboratoire, combinant la capacité de se lier à la surface des bactéries pathogènes et celle d'émettre un signal lumineux dans sa configuration liée (uniquement). La détection du signal et la mesure de son intensité permettent la détection et la quantification de la contamination microbienne (Tiju et Morrisson, voir note 22).

Concernant la conservation des aliments, la détection d'agents pathogènes, de leurs toxines ou d'allergènes, les nanotechnologies permettent de miniaturiser des plateformes de biosenseurs, appelées "puces". Déjà connues dans le domaine de l'électronique (avec les puces à transistors) et de la biologie moléculaire (avec les puces à ADN), ces puces concentrent, sur de très petites surfaces, de nouvelles générations de nano-biosenseurs, permettant théoriquement la reconnaissance et la quantification de n'importe quelle molécule cible qui en justifierait le développement. La miniaturisation des puces permet leur intégration dans de nouvelles matrices (alimentaires notamment) et la production de données "à haut débit", compatible avec des chaînes de contrôle de denrées alimentaires à l'échelle industrielle²⁶.

3.1.4 Étiquetage dynamique et traçage de l'aliment

Les nanocapteurs intégrés à l'aliment ou à son emballage permettent de suivre, non seulement les contaminants chimiques ou microbiologiques, comme il a déjà été évoqué, mais aussi l'évolution de la composition de l'aliment au cours de la transformation et dans la chaîne de distribution. Jusqu'à ce jour, l'étiquetage cherche à informer le plus fidèlement possible sur la composition de l'aliment au cours de la période de distribution et utilise une moyenne, obtenue par calcul ou par analyse comme le prévoit la législation européenne²⁷, qui ne peut rendre compte du changement éventuel de composition au cours de la commercialisation. Disposer de nanocapteurs actifs au cours de la transformation et de la commercialisation ouvre ainsi la voie aux traceurs d'historiques technologiques.

L'incorporation de nanoparticules "signatures" dans l'aliment en permet également le marquage, sortes de "codes-barres" qui, intégrés à l'aliment plutôt qu'apposés à son emballage, en renforcent la traçabilité et, à terme, permettraient de fournir des informations plus complètes et directement sur le lieu de vente.

3•2 œUVRER À UNE MEILLEURE TRANSPARENCE SUR LES APPLICATIONS AGRICOLES ET ALIMENTAIRES

Ceux qui tentent de dresser l'inventaire des applications nanotechnologiques au domaine de l'agriculture et de l'alimentation en soulignent généralement la difficulté. Plusieurs explications peuvent être avancées.

Tout d'abord, les difficultés autour de la définition des nanoproduits rendent incertaine l'inclusion de certains produits commercialisés dans une telle liste. À titre d'exemple, une formulation d'oxyde de titane autorisée sur les marchés comme additif alimentaire (TiO₂, INS 171) contient probablement une fraction nanométrique, sans que ce produit soit identifié comme issu des nanotechnologies. De façon similaire, la silice amorphe est utilisée depuis de longues années dans des produits d'emballage et la forme conventionnelle (SiO₂, INS 551) est un additif alimentaire autorisé, sans que l'attention n'ait été portée sur la distribution des tailles de particules du produit commercial et sur la composante nanométrique impliquée dans ses propriétés fonctionnelles.

Une deuxième raison tient à l'existence de nombreux brevets, certes instructifs sur les potentialités d'application, mais qui ne permettent pas de conclure si les produits ont été mis sur le marché ou le seront même un jour, et qui créent en conséquence un certain flou sur les développements industriels des nanoproduits. Plus généralement, et au vu de l'ensemble des informations disponibles, il s'avère d'ailleurs difficile de distinguer les applications actuelles (produits sur le marché) des applications potentielles ou annoncées, d'autant plus qu'aucun registre officiel des produits issus des nanotechnologies introduits sur le marché n'est disponible.

²⁶ On trouvera la description d'une plateforme de biosenseurs d'allergènes alimentaires dans Vermeir S., Pollet J., Vergauwe N., Lammertyn J. (2010), in Huyghebaert A., Van Huffel X., Houins G. (eds.) Nanotechnology in the Food Chain: Opportunities and Risks, 37-44, Brussels,

²⁷ Art. 9 et 31 du règlement (UE) N° 1169/2011 du 25 octobre 2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires.

Une troisième raison tient en effet aux dispositifs réglementaires qui, en Europe comme ailleurs dans le monde, privilégient les domaines d'applications des nanoproduits pour identifier les normes qui s'y

appliquent, plutôt que de développer des normes propres aux nanoproduits et indépendantes des secteurs d'applications (qualifiées dans ce deuxième cas de figure de normes *horizontales*, ou non sectorielles, dont les OGM fournissent un exemple remarquable dans l'Union européenne et qui la met d'ailleurs en conflit avec ses partenaires commerciaux). L'Europe communautaire appliquera et adaptera ses normes juridiques existantes lorsqu'il s'agira de substances chimiques (comme le règlement REACH EC/1907/2006), de nouveaux aliments (règlement Novel Food EC/258/97), d'additifs alimentaires ou de matériaux d'emballage (EC/1935/2004), etc., tout en rappelant que la mise sur le marché est conditionnée par une autorisation préalable, nécessitant un cadre approprié d'évaluation des risques et d'information du consommateur. En conséquence des multiples réglementations sectorielles concernées par les applications des nanotechnologies, il s'avère difficile de dresser aujourd'hui les inventaires des produits issus des nanotechnologies autorisés sur les marchés. À cela s'ajoute qu'une autorisation de mise sur le marché européen ne signifie évidemment pas que les produits soient commercialisés dans l'ensemble des pays membres.

Une quatrième raison tient au manque de transparence des industries agro-alimentaires dans le secteur, oscillant entre promotion des nanoproduits sur leurs sites internet commerciaux et minimisation de leur présence actuelle dans les produits alimentaires ou leurs emballages²⁸.

4 ■ NANOTECHNOLOGIES À L'INRA ET AU CIRAD²⁹

4•1 APERÇU DES RECHERCHES DANS LE DOMAINE DES NANOTECHNOLOGIES À L'INRA ET AU CIRAD

Les recherches relevant des nanotechnologies concernent plusieurs des domaines d'application évoqués précédemment, dont la fabrication de nanostructures pour les emballages, les procédés, les nanocapteurs, les bio-senseurs et la traçabilité. Au sein de l'Inra, les départements développant ces travaux - accueillant en tout quelque 30 chercheurs dans le champ des nanotechnologies - sont le département CEPIA (en ses 4 unités BIA Nantes, STLO Rennes, IATE Montpellier, ISBP à Toulouse), les départements AlimH, PHASE et SPE et le département SAE2.

Plus précisément: CEPIA (Caractérisation et élaboration des produits issus de l'agriculture) travaille sur les nanomatériaux pour l'emballage, la nano-encapsulation, les nanoparticules pour l'imagerie, les nanoprocédés de type "laboratoires-sur-puces" (*lab-on-a-chip*) ; PHASE (Physiologie animale et système d'élevage) développe des nanocapteurs et bio-senseurs ; SPE (Santé des plantes et environnement) développe des nanoparticules pour la biocatalyse, selon des approches biomimétiques inspirées de nanostructures virales ; AlimH (Alimentation humaine, en son Unité Toxalim de Toulouse) étudie la toxicité de nanoparticules ingérées ; SAE2 (Sciences sociales, agriculture et alimentation, environnement) aborde les questions de perception du public, d'analyse coûts/bénéfices, de gouvernance des technologies innovantes (dont les nanotechnologies) et de dynamique de recherche par des clusters de recherche mondiaux.

Ajoutons que le département EA (Environnement et Agronomie) de l'Inra a développé par le passé des recherches sur la dynamique des nanostructures argileuses du sol, en relation avec le devenir de polluants métalliques dans les sols contaminés.

Au Cirad, des recherches sur des analogues naturels des nanotubes sont conduites par l'UR 78 "Recyclage et risque". Ces matériaux originaux (imogolite et allophane) se retrouvent dans les sols volcaniques tropicaux. Leur observation *in situ*, puis le développement de procédés de synthèse au laboratoire ont permis de comprendre les mécanismes de formation de ces nanoparticules dans les sols, de comprendre leur rôle de séquestration vis-à-vis d'éléments toxiques (comme les éléments traces métalliques dans les sols), de maîtriser la taille et la forme des nanoparticules synthétisées³⁰.

²⁸ Toutefois, prenant en compte le souci d'information du consommateur, le législateur européen a rendu obligatoire, à partir de 2014, la déclaration des nanomatériaux dans la liste des ingrédients: "Tous les ingrédients qui se présentent sous forme de nanomatériaux manufacturés sont indiqués clairement dans la liste des ingrédients. Le nom des ingrédients est suivi du mot "nano" entre crochets". (Extrait de l'article 18 du règlement "Information des Consommateurs" EU 1169/2011 du 25 octobre 2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires).

²⁹ Source: exposé de Monique Axelos au Comité d'éthique du 2 juillet 2010 et note interne "Nanosciences et nanotechnologies à l'Inra" de Monique Axelos, avec l'aide d'Isabelle Maillet et Marc Anton, du 5 mai 2011.

³⁰ Ces travaux sont prolongés par le développement d'applications de traitement de certains effluents, à l'aide de ces nanotubes de synthèse ou naturels. Sur la question des risques pour la santé, une recherche est consacrée à l'étude de l'influence des caractéristiques structurales des nanotubes d'imogolite sur leur toxicité au niveau de l'appareil respiratoire.

Tableau*: Recherches appliquant les nanotechnologies à l'Inra et au Cirad

Unité**	Thèmes	Applications
BIA / CEPIA	- nanoémulsions - nanoparticules protéiques et lipidiques - nanosondes - modélisation des nanostructures - nanocristaux d'origine biologique	- encapsulation, libération contrôlée - interactions biologiques - détection - émulsions, mousses, dépôts surfaces à visée non alimentaire
IATE / CEPIA	- nanocomposites - migration de nanoparticules - nanocapsules	- emballages actifs - libération contrôlée
ISBP / CEPIA	- ingénierie enzymatique - bio-nanoparticules	- vectorisation / autres applications encore mal identifiées
GENIAL / CEPIA	- nanoparticules protéiques et lipidiques	- encapsulation, libération contrôlée
STLO / CEPIA	- nanoparticules protéiques et lipidiques	- encapsulation, libération contrôlée
NoeMI / PHASE	- nanosomes porteurs de récepteurs olfactifs	- nano-bio-senseurs olfactifs
BFP / SPE	- nanoparticules virales vecteurs d'enzymes	- vectorisation d'enzymes
TOXALIM / ALIMH	- devenir des nanomatériaux dans l'organisme; effets pro-inflammatoires ou encore génotoxiques	- toxicologie des nanoparticules
Labex*** "SERENADE" impliquant BIA TOXALIM et IATE	- "SERENADE": Safe Ecodesign and sustainable Research and Education applied to NANomaterial DEvelopment): Eco-design et analyse du cycle de vie de nanomatériaux	- conception d'éco-nanomatériaux composites, toxicologie et cycle de vie
UR Risque et recyclage - Persyst (Cirad)	- nanotubes naturels et synthétiques	- fonctionnement bio-géochimique des sols - traitement des déchets - toxicologie des nanoparticules

* Tableau adapté du rapport "Nanosciences et nanotechnologies à l'Inra" (M. Axelos, 2011) et complété à la suite des échanges des rapporteurs du Comité d'éthique avec les chercheurs de l'Inra et du Cirad.

** Nom de l'unité et département de recherche.

*** Labex: laboratoire d'excellence (Investissements d'avenir).

4•2 QUELLES PRATIQUES DES NANOTECHNOLOGIES À L'INRA ET AU CIRAD

Au vu des recherches répertoriées, mais aussi suite aux échanges avec des chercheurs, il semble que l'on puisse caractériser les pratiques de recherche dans le champ des nanotechnologies de la façon suivante :

- (a) Les chercheurs s'identifient moins aux nanotechnologies qu'aux finalités de leurs recherches (valorisation des produits de l'agriculture, santé des plantes, environnement, etc.) qui constituent la raison d'être de leur département d'affiliation et leur motivation profonde à y déployer leur activité scientifique.
- (b) Les recherches en nanotechnologies apparaissent de ce fait assez dispersées. Elles n'exercent que faiblement un rôle fédérateur au sein des organismes, d'autant qu'il n'y a pas de regroupement autour de grandes infrastructures.
- (c) Les nanotechnologies, ouvrant de nouveaux possibles techniques, sont appropriées, dans une perspective instrumentale avant tout, pour l'avancée des connaissances et pour l'innovation. Elles suivent, plutôt qu'elles précèdent ou fondent, une politique scientifique définie.
- (d) Les recherches dans le champ des nanotechnologies visent à exploiter de nouvelles interfaces, les chercheurs y trouvant un attrait particulier: celui de la rencontre d'autres disciplines ("l'ailleurs" qui invite à repenser son propre champ disciplinaire), mais aussi la puissance technique des nouvelles interfaces, notamment entre le "physique" et le "biologique" (nano-bio-senseurs, nano-bio-catalyseurs, etc.)
- (e) Par les nanotechnologies, le chercheur développe de nouveaux rapports avec le matériel biologique (y compris les produits de l'agriculture): à l'exploitation de ses propriétés, y compris celles, cryptiques, qu'une

approche nanotechnologique "descendante" met à jour (propriétés optiques, électriques, magnétiques, catalytiques, etc.), s'ajoute une approche "ascendante", désignant l'assemblage maîtrisé de nanostructures dites "biomimétiques" ou "bio-inspirées", lorsqu'elles imitent ou s'inspirent des systèmes biologiques. À l'Inra, cette approche ascendante produit des bio-catalyseurs auto-assemblés à la façon des particules virales (bio-inspirés), ou des "nez artificiels", assemblage de nano-bio-senseurs olfactifs (biomimétiques). Le vivant est ainsi doublement sollicité : comme système que l'on démonte et fractionne, et dont on révèle les propriétés cachées des matériaux, mais aussi comme modèle, dont la connaissance fine inspire et rend possible l'assemblage de nouveaux nano-systèmes³¹.

(f) Les recherches menées par le Cirad et axées sur le développement du Sud ne font que très peu appel aux nanotechnologies. Ceci pose la question des conditions scientifiques et techniques de ces recherches (notamment en ce qui concerne la sécurité), mais aussi celle de l'accessibilité de ces nouvelles technologies et de la pertinence que leur reconnaissent les acteurs de la recherche. Les problèmes agricoles, alimentaires et environnementaux auxquels les nanotechnologies proposent des solutions peuvent en effet être résolus en adoptant d'autres scénarios techniques, semblant laisser davantage d'autonomie aux populations locales et mieux valoriser les savoirs traditionnels.

5 ■ DES RISQUES À ÉVALUER ET À GÉRER

L'évaluation éthique d'une technologie ne se réduit pas à l'appréciation des risques et des conséquences. Ceux-ci, bien entendu, ne doivent pas être négligés. Nous situons quelques difficultés à ce niveau, engageant la responsabilité des chercheurs et des organismes.

Selon le paradigme adopté internationalement, l'évaluation des risques procède par étapes : identification des dangers, caractérisation des dangers (de leurs conséquences néfastes, c'est-à-dire des dommages, et de leur sévérité), évaluation de l'exposition aux dangers et, enfin, caractérisation du risque en tant que fonction de la probabilité d'occurrence des effets néfastes et de leur sévérité. La gestion du risque, quant à elle, identifie des mesures visant à prévenir ou à réduire l'occurrence des dommages. Elle inclut des mesures de surveillance, en vue de valider ou d'affiner les mesures de prévention des risques, ainsi qu'à mettre à jour d'éventuels effets non prévus et à préciser les effets à long terme. Elle peut aussi prévoir des plans de traitement des dommages, s'ils venaient à se réaliser, et anticiper les actions nécessaires avant le retour (total ou partiel) à une situation satisfaisante ("plan de continuité").

Les risques des nanotechnologies appliquées à l'agriculture et à l'alimentation doivent être évalués en recourant aux mêmes principes - le Comité scientifique de l'EFSA a d'ailleurs formellement conclu dans ce sens³² - mais c'est au niveau de leur mise en œuvre que plusieurs difficultés surviennent. On trouvera un approfondissement de ces questions dans les documents mentionnés³³ et les nombreuses références citées.

Au niveau de l'identification et de la caractérisation des dangers, la diversité des effets et surtout leur imprévisibilité posent des défis considérables. Exploités pour leurs réactivités nouvelles liées à leurs très petites tailles, les nanomatériaux recrutés pour des applications ciblées sont susceptibles de développer de multiples effets connexes. Ceux-ci nécessitent des outils d'observation adéquats et des protocoles standardisés en vue de l'évaluation de leur possible toxicité. Or, de tels protocoles font largement défaut aujourd'hui, malgré les efforts internationaux en la matière (au niveau de l'OCDE en particulier)³⁴. Parmi les difficultés soulevées par la caractérisation des dangers, figure en premier lieu la définition de la dose et des outils et standards métrologiques adaptés. Comparativement aux substances chimiques correspondantes non nanométriques, où la masse est classiquement utilisée pour définir la dose, il faut, pour les nanomatériaux et nanoparticules, faire appel complémentairement ou alternativement à d'autres paramètres comme la surface, le

³¹ Approches "ascendante" et "descendante", au contraire de s'opposer, peuvent aussi s'unir dans la création de nanodispositifs, notamment lorsque le *top down* de la microélectronique produit des supports solides sur lesquels des réseaux de nano-bio-objets (produits par des mécanismes *bottom up* "bioinspirés") sont disposés.

Ces interfaces, entre le "physique" et le "biologique", convergences d'approches *top down* et *bottom up*, constituent les principaux défis techniques à relever pour produire les nanosystèmes 3D évoqués précédemment.

³² Voir 18.

³³ Voir 2, 14, 18, ainsi que le Rapport d'expertise collective et l'Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (AFSSET) relatif à "Evaluation des risques liés aux nanomatériaux pour la population générale et dans l'environnement", de mars 2010.
http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/46055223010146809704132465478/10_03_ED_Les_nanomatateriaux_Rapport_compresso.pdf
http://www.anses.fr/ET/DocumentsET/10_3_ED_Les_nanomatateriaux_Avis.pdf

³⁴ www.oecd.org/env/nanosafety/database

rapport entre la surface et le volume, le nombre et la distribution des tailles des particules, la charge et la densité de charges, etc. Faute d'accord sur les doses-étalons, les analyses toxicologiques sont contraintes de définir, autant que possible, le matériel test, mais le peu de standardisation des protocoles freine la mise en place d'un cadre international d'évaluation.

La caractérisation de l'exposition ne semble guère plus simple. Aux difficultés d'observation et de mesure (à nouveau le problème des doses-étalons !) s'ajoutent celles liées au comportement des nanomatériaux et nanoparticules dans l'environnement: les propriétés de surface et la distribution des tailles des nanoparticules provoquent des propriétés inédites de mobilité, d'agglomération et d'agrégation, de solubilisation, de stabilité générale (pour les définitions, voir SCENIHR 2007)³⁵. Leur dynamique dans les organismes vivants et dans l'environnement est donc particulièrement difficile à définir, et partant, la caractérisation de l'exposition, étape essentielle de l'évaluation des risques. Il est toutefois d'ores et déjà reconnu que des barrières biologiques efficaces pour de nombreux composés chimiques traditionnels, comme celles du placenta et du cerveau, ne le sont pas nécessairement pour leurs équivalents nanométriques. Quelques références récentes peuvent être conseillées sur l'ensemble de ces questions³⁶.

La caractérisation du risque qualifie et quantifie le risque sur la base des connaissances rassemblées aux niveaux précédents (dangers, conséquences néfastes des dangers et expositions). Elle doit aussi formuler les incertitudes entachant ses conclusions, qu'elles résultent de difficultés épistémiques (que pouvons-nous savoir et comment ?), analytiques (quelles limites de nos instruments de mesure ?), statistiques (quel biais d'échantillonnage ?) ou de biais méthodologiques ou conjoncturels (comme le sous-financement de certains domaines de recherche). Les nanotechnologies soulèvent des difficultés à chacun de ces niveaux.

La gestion du risque se veut justifiée (les mesures préventives adoptées doivent permettre une réduction effective des dommages) et proportionnée (les coûts consentis doivent être en proportion des risques encourus) et doit s'appuyer sur une connaissance suffisante du risque, donc sur sa bonne évaluation et sur la juste appréciation des incertitudes. Ces incertitudes fondent également une obligation de recherche et de surveillance, avant l'étape de production industrielle, afin de protéger les travailleurs directement exposés, et après mise sur le marché.

Face au déficit de connaissance sur chacune des composantes du risque, à la nécessité d'élaborer jusqu'aux méthodes et protocoles d'analyse, aux incertitudes aux multiples sources, la responsabilité des organismes publics de recherche paraît importante.

³⁵ Voir 2.

³⁶ Cedervall T. et al. (2012). Food chain transport of Nanoparticles affects behaviour and fat metabolism in fish. *PLoS ONE* 7(2):e32254; Cockburn A. et al. (2012). Approaches to the safety assessment of engineered nanomaterials (ENM) in food. *Food and chemical toxicology* (In press); Kahru A. and Savolainen K. (2010). Potential hazard of nanoparticles: from properties to biological and environmental effects. *Toxicology*, 269: 89-91; Magnusson B. et al. (2011). A brief review of the occurrence, use, and safety of food-related nanomaterials. *Journal of food science*, 76: R126-133; Rico C. (2011). Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of agricultural and food chemistry*, 59: 3485-98; Savolainen K. (2010). Risk assessment of engineered nanomaterials and nanotechnologies—a review. *Toxicology*, 269: 92-104; Som C. (2010). The importance of life cycle concepts for the development of safe nanoproducts. *Toxicology*, 269: 160-169.

6 ■ NANOTECHNOLOGIES ET PAYS DU SUD

Les risques technologiques définis plus haut concernent les dommages potentiels à la santé et à l'environnement et tentent d'en exprimer la probabilité et la sévérité. L'évaluation scientifique du risque avant mise sur le marché, selon les normes internationales qui s'y appliquent, se limite ainsi aux impacts mesurables des innovations sur des variables biologiques et environnementales, sans considérer leurs effets économiques et sociaux. Cette approche est régulièrement critiquée par ceux - dont de nombreuses ONG - qui estiment que l'évaluation d'une technologie avant mise sur le marché devrait être étendue à ses impacts socio-économiques potentiels. Sans entrer dans ce débat qui porte en définitive sur les attentes des citoyens à l'égard des instances de décision et de régulation, on ne peut contester que des technologies systémiques, à large spectre d'application, puissent produire des effets sur les économies et les sociétés, bénéfiques ou néfastes selon les critères du jugement.

Les technologies émergentes se développent dans des contextes qui leur sont favorables et que, par ailleurs, elles confortent: structures partenariales, protection de la propriété intellectuelle, règles du commerce

international, normalisation et certification, etc. Leurs effets sur les relations Nord-Sud sont alors interrogés, comme l'a bien montré le débat sur les OGM et leur contribution possible à la réduction de la faim et de la pauvreté. Les nanotechnologies n'y échappent pas et la question de leur contexte associé et des conditions de leur utilisation par les pays en développement est posée.

Avant toute considération des effets socio-économiques, il est nécessaire d'identifier les finalités poursuivies. Un rapport récent de l'IFPRI (*International Food Policy Research Institute*)³⁷ examine les opportunités, les contraintes et le rôle de la recherche agronomique internationale dans le domaine des nanotechnologies et de leurs applications à l'agriculture, l'alimentation, l'eau, et plus largement à la réduction de la pauvreté. Il se réfère notamment à une enquête menée auprès de 63 experts issus des pays industrialisés et en développement, invités à décrire les dix nanotechnologies les plus aptes à contribuer à réduire le sous-développement et à classer leurs applications selon les bénéfices attendus dans les domaines de l'eau, de l'agriculture, de la nutrition, de la santé, de l'énergie et de l'environnement. L'un des critères mis en œuvre portait sur l'applicabilité de la technologie dans les pays pauvres et la probabilité d'effets concrets dans les dix années à venir. Les résultats de cette enquête ont été publiés en 2005 par Salamanca-Buentello *et al.* (2005)³⁸. Parmi les dix domaines d'application les plus prometteurs, les trois premiers sont : (i) le stockage, la production et la conversion d'énergie (cellules photovoltaïques plus performantes, stockage et production d'hydrogène par nanotubes de carbone et nanocatalyseurs, etc.), (ii) l'augmentation de la productivité de l'agriculture (matériaux nanoporeux de type zéolites pour la rétention d'eau et de fertilisants dans les sols, nanocapsules pour le relargage progressif d'herbicides, nanosenseurs pour le suivi de la qualité du sol et de la santé des végétaux, nano-aimants pour la décontamination des sols, etc.), (iii) le traitement des eaux et la remédiation (par nanomembranes, nanosenseurs, nanocatalyseurs de réactions dégradatives de polluants, nanomatériaux piégeurs de contaminants, nano-aimants décontaminants, etc). Parmi les sept autres domaines, on compte le stockage et la transformation des aliments (en sixième position), l'assainissement de l'air (en septième position), la détection et le contrôle des agents parasitaires et vecteurs de maladies (en dixième position). Ces dix domaines d'application ont ensuite été reliés aux objectifs du Millénaire des Nations unies, en particulier la réduction de la mortalité infantile et de la morbidité des mères, la soutenabilité de l'environnement, l'éradication de l'extrême pauvreté et de la faim, la lutte contre les maladies infectieuses.

Une autre étude mandatée par le Conseil national de la Recherche des Académies nationales des États-Unis a interrogé un panel d'experts sur les technologies émergentes à même de soutenir l'agriculture en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud (NRC, 2008)³⁹. Les applications des nanotechnologies visant à améliorer la rétention et le relargage progressif de l'eau et des nutriments dans les sols sont considérées comme prioritaires. La mauvaise qualité des sols est en effet un facteur limitant majeur de la productivité végétale dans ces contextes agro-écologiques et les nanotechnologies proposent des solutions techniques jugées efficaces et applicables.

Mais la réflexion ne peut s'arrêter aux promesses technologiques et doit s'attarder sur les conditions de leur réalisation, sur le contexte associé aux nanotechnologies et les freins à leur valorisation dans les pays en développement. Malgré les opportunités technologiques relevées, peu de pays en développement ont des programmes propres dans le domaine des nanotechnologies et ceux qui s'y sont engagés connaissent des dynamiques de recherche et d'innovation caractéristiques d'économies dites émergentes : Chine, Inde et Brésil arrivent en tête des investissements consacrés aux infrastructures, aux brevets et à la recherche fondamentale, avec des accents propres à chaque pays⁴⁰. Pour les autres pays en développement, le constat est celui d'un engagement faible, voire inexistant. Les raisons avancées sont multiples et généralement communes à d'autres technologies émergentes, comme les biotechnologies :

- la faiblesse des structures institutionnelles, freinant les investissements dans les infrastructures et dans la formation ;
- les incertitudes juridiques sur la protection de la propriété intellectuelle ;
- l'absence de cadre légal et réglementaire organisant l'évaluation et la gestion des risques ;

³⁷ Gruère G. *et al.* (2011), Agriculture, Food, and Water nanotechnologies for the Poor – Opportunities, Constraints, and Role of the Consultative Group on International Agricultural Research, IFPRI. Discussion Paper 01604.

³⁸ Salamanca-Buentello F. *et al.* (2005). Nanotechnology and the developing world. *PLoS Medicine* 2(5): e97.

³⁹ National Research Council (2008). Emerging technologies to benefit farmers in sub-Saharan Africa and South Asia. *The National Academies Press*, pp292, Washington, D.C.

⁴⁰ Voir 37 et les références citées.

- les incertitudes du marché, l'absence de vision claire sur les possibilités de commercialisation sur les marchés intérieur et extérieur;
- la faiblesse des investissements privés sur des marchés peu solvables et marqués par les incertitudes relevées aux points précédents.

Aucune de ces questions ne peut trouver de réponses immédiates et sûres, et on comprend que seuls des pays confiants dans leurs capacités à soutenir leur développement à long terme par la recherche et l'innovation soient aujourd'hui engagés dans les nanotechnologies.

Les nanotechnologies seraient dès lors un révélateur, voire un amplificateur, des différentiels de développement technologique et économique dans les pays du Sud. Pourtant, il ressort de la description des perspectives d'application ci-dessus qu'un certain nombre d'entre elles (tels les zéolites, nano-silicates naturels améliorant la rétention d'eau dans les sols) ne requièrent ni une recherche de pointe, ni des financements considérables. Il paraît donc important d'adopter avec les nanotechnologies une approche différenciée et de ne pas écarter des applications现实istes et pertinentes pour les pays les moins avancés, sous prétexte de leur difficulté à mener des projets d'envergure sur le front de la recherche.

Pourtant les ONG ont rapidement investi le débat, développant leurs arguments sur les éléments de contexte des nanotechnologies et défendant la thèse selon laquelle les nanotechnologies devraient renforcer les inégalités par des effets de pouvoir liés aux monopoles commerciaux et aux brevets. Ces arguments sont développés dans des articles et rapports récents aux titres évocateurs⁴¹: *Nanotechnology and the extension and transformation of Inequity* et *The Big Downturn? Nanogeopolitics*. Comme elles l'ont fait avec les OGM, les ONG environnementalistes, comme Friends of the Earth pour laquelle écrit Georgia Miller⁴², tendent à déplacer ensuite la ligne de front de leurs critiques sur la question des risques pour l'environnement et la santé.

Un rapport français récent examine les risques posés et les obstacles à la concrétisation des opportunités offertes par les nanotechnologies⁴³. On y évoque les risques qui seraient liés au développement des nanotechnologies à l'échelle mondiale: d'une part, le transfert des risques sanitaires et environnementaux aux pays du Sud dans le cadre d'une délocalisation de la production; d'autre part, la concurrence commerciale entre les matières premières sur laquelle repose une partie de l'économie des pays en développement et les matériaux de synthèse aux propriétés améliorées que peuvent produire les nanotechnologies (par exemple la filière du coton pourrait être déstabilisée par les nouveaux textiles utilisant des nanomatériaux). Sur le premier point, rien ne semble, à notre connaissance, corroborer ce risque. Concernant la deuxième critique, le risque identifié n'est pas propre aux nanotechnologies: les fibres de synthèse concurrencent depuis long-temps les textiles naturels, tout comme le caoutchouc synthétique concurrence le caoutchouc naturel. De plus, les nanotechnologies permettent de mettre à jour et d'exploiter des propriétés inédites de molécules naturelles, ce qui crée au contraire de nouvelles opportunités de valorisation et de commercialisation des bioressources. Des travaux menés à l'Inra l'illustrent bien, en montrant que l'hyper-fractionnement de la cellulose produit des nano-cristaux aux propriétés anti-réfléchissantes insoupçonnées lorsqu'on les dépose en couches dans des surfaces composites⁴⁴. Les nanotechnologies pourraient donc soutenir, plus qu'affaiblir, les économies du Sud productrices de bioressources, en créant de la valeur.

En conclusion, les nanotechnologies concernent les pays du Sud, en élargissant le champ des possibles dans la recherche de solutions aux problèmes de la production agricole, de la conservation des ressources, de la santé et du bien-être des populations. Mais la réalisation des possibles nécessite la mise en place d'un contexte d'innovation approprié. Il y a, en premier lieu, la formation d'experts locaux, capables d'ajuster les solutions aux problèmes du terrain, de les confronter aux alternatives techniques, notamment celles issues des savoirs traditionnels, moins pour les opposer que pour les renforcer mutuellement.

Il y a ensuite les conditions juridiques et économiques de l'innovation. Il revient aux autorités publiques d'assurer un juste accès aux nouveaux produits et services, tout en garantissant une sécurité juridique aux inventeurs et entrepreneurs. Il leur revient aussi de nourrir le dialogue avec la société sur les priorités de

⁴¹ Miller G. and Scrinis G. (2011). Nanotechnology and the extension and transformation of Inequity, in S.E. Cozzens, J.M. Wetmore (eds.), *Nanotechnology and the Challenges of Equity, Equality and Development. The Yearbook of Nanotechnology in Society*. Volume 2: 109-126, Springer Science and Business Media B.V.
 ETC - Action Group on Erosion, Technology and Concentration - (2010) The Big Downturn?
Nanogeopolitics, pp76, <http://www.etcgroup.org/en/node/5245>

⁴² Voir 41.

⁴³ Lebret M.-C. et al. (2010). Risques et opportunités trans-sectoriels des nanotechnologies pour les pays en développement: nanotechnologies et pays en développement, une étude pour l'Agence française de développement - Rapport n°3 du Gret et Vivagora Gret, 2010/05. - 26 p.

⁴⁴ Département CEPIA / Unité BIA de Nantes, Bernard Cathala et collaborateurs.

recherche et d'innovation, sans que les choix présents n'hypothèquent les futurs possibles. Aucune technologie ne libère ou n'esclavagise par elle-même, mais aucune n'apparaît neutre au moment de son actualisation dans des échanges économiques et sociaux. L'essentiel est alors un engagement lucide et proactif dans l'évaluation des opportunités et des enjeux, dans la mise en place d'un cadre d'innovation compatible avec les fins poursuivies.

7 ■ QUESTIONS ÉTHIQUES : POUR UN ACCOMPAGNEMENT RÉFLEXIF DES NANOTECHNOLOGIES

7•1 ORIGINALITÉ DES NANOTECHNOLOGIES ET CONSÉQUENCES ÉTHIQUES

Telles qu'on peut les apprécier, les nanotechnologies ne procèdent pas d'une volonté d'obtenir une meilleure représentation de la nature - comme le fut, par exemple, la théorie de la relativité ou la théorie de l'évolution. La motivation semble beaucoup plus pragmatique: l'accès à une échelle de grandeur ouvre un éventail de phénomènes et de possibilités à exploiter, qui sont démultipliés par l'existence d'une convergence entre plusieurs secteurs de recherche. Les nanotechnologies ne remettent donc pas en cause directement les catégories à l'aide desquelles nous pensons le monde, mais celles avec lesquelles nous pensons notre rapport au monde, notre façon d'agir dans le monde, notre mode d'agir technique: faire, savoir-faire, fabrication, production, action...

La modernité occidentale a été caractérisée par une rencontre de la science et de la technique (mathématisation de la physique) qui a permis un développement technologique sans précédent. Elle s'est construite autour d'une volonté de domination et de contrôle de la nature, exprimée avec une éloquence toute particulière par Bacon⁴⁵. Cette volonté de percer les secrets de la nature et de la maîtriser s'est accompagnée d'une affirmation de prévisibilité. Pour dominer, pour contrôler, il faut prévoir, il faut savoir à l'avance ce qui va se passer.

Les nanotechnologies sont souvent présentées comme l'accomplissement de cette ambition de domination de la nature ou de la matière: il est question de "traquer la matière dans ses derniers retranchements". La fascination du *bottom up* procède de cette visée dominatrice, l'objectif étant de maîtriser la matière, élément par élément. Mais elles se caractérisent aussi par les propriétés non prévues qu'elles mettent à jour. C'est même ce qui les définit le mieux: les nanotechnologies mettent l'inattendu au cœur de leur projet⁴⁶. Cette dualité a souvent été remarquée: on a parlé d'une tension entre "émergence et contrôle" (CNRS)⁴⁷, entre "la maîtrise de l'ingénieur" et "l'émergence de l'imprévisible" (CCNE)⁴⁸.

Cette dualité se retrouve dans les attentes à l'égard des nanotechnologies: l'ambition de toute puissance s'inverse en effroi d'une puissance qui nous échappe. Du fait que les nanotechnologies font apparaître des propriétés inédites et imprévisibles, on objecte, comme Dupuy⁴⁹, que "la technologie qui se profile à l'horizon (...) vise précisément à la non-maîtrise. L'ingénieur de demain ne sera pas un apprenti-sorcier par négligence ou incomptance, mais *par finalité*". Le mythe de l'apprenti-sorcier est celui d'une puissance hors de contrôle, ce que l'on a désigné sous le nom d'autonomie de la technologie: l'idée que les techniques suivent leurs propres lois de développement et que nous n'avons plus de pouvoir sur elles.

On peut donc considérer que les développements techniques récents (du nucléaire aux biotechnologies et aux nanotechnologies), loin de confirmer notre volonté d'une maîtrise totale de la nature, l'ont plutôt remise en question: en voulant contrôler la nature, nous nous rendons compte que les techniques que nous avons développées dans ce dessein, nous échappent et peuvent se retourner contre nous. Il nous faut donc reconstruire les catégories à l'aide desquelles nous pensons notre rapport à la nature et à la matière, et passer de la domination aux interactions entre les hommes et la nature.

⁴⁵ "S'il se trouve un mortel qui n'ait d'autre ambition que celle d'étendre l'empire et la puissance du genre humain tout entier sur l'immensité des choses, cette ambition, on conviendra qu'elle est plus pure, plus noble et plus auguste que toutes les autres; or l'empire de l'homme sur les choses n'a d'autre base que les arts et les sciences, car on ne peut commander à la nature qu'en lui obéissant". Francis Bacon, *Novum Organum* (1620), § 129.

⁴⁶ Certains chercheurs interrogés par les rapporteurs du présent avis soulignent toutefois que, même si certaines découvertes relèvent de "hasards heureux", ces découvertes n'en restent pas moins voulues et des lois descriptives et prédictives sont proposées.

⁴⁷ COMETS-CNRS (2006). Avis: enjeux éthiques des nanosciences et des nanotechnologies.

⁴⁸ CCNE (2007). Avis n° 96: Questions posées par les nanosciences, les biotechnologies et la santé.

⁴⁹ Dupuy J.-P. (2008). *La marque du sacré*. Carnets Nord, p.83-84, Paris.

Il s'agit, en s'appuyant sur de nombreux travaux d'épistémologie et de philosophie des techniques, de reconnaître que les métaphores de la domination ne sont pas adaptées aux nanotechnologies. Celles-ci, à la différence de beaucoup de démarches scientifiques antérieures (mais de façon comparable aux biotechnologies) ne dégagent pas des lois générales, n'élaborent pas des modèles, elles ont rapport à des objets. Les objets que les nanotechnologies font entrer en scène, ont le "mode d'existence des objets techniques" décrit par Gilbert Simondon⁵⁰. Ils existent dans un contexte où ils deviennent concrets : une existence relationnelle et non indépendante.

Cette irruption de l'objet dans notre monde marque un changement important de notre culture. Les objets que font apparaître les nanotechnologies ne sont plus des représentations matérialisées instanciant les lois générales de la nature. Ce sont des systèmes complexes qui constituent une réalité auto-suffisante, non référentielle, considérée comme ayant des pouvoirs participant de l'ordre naturel. Le "credo" de la modernité était l'équivalence entre la connaissance des choses et la capacité de répéter leur processus de production (assimilé à une fabrication) : *Verum et factum convertuntur*⁵¹. Les technosciences se définissent au contraire par le fait que nous ne connaissons pas le processus constitutif des systèmes dont nous nous occupons. On peut parler de naturalisation de l'artifice, au sens où ces artefacts peuvent être indissociables, dans leur comportement, d'être naturels et au sens où ils doivent être étudiés comme des systèmes naturels, par voie inductive. Il y a aussi l'inversion annoncée par la biologie synthétique dans notre rapport au vivant : la naturalisation de l'artefact succédant à l'artificialisation de la nature. Pour savoir tout ce dont un système technoscientifique sera capable, il faut le voir fonctionner.

C'est dans ce contexte, celui d'une culture scientifique et technique nouvelle, que l'on est conduit à requalifier notre action technique. Les nanotechnologies ne fabriquent pas des objets suivant un modèle préétabli, elles explorent des possibles naturels. Il ne s'agit pas tant de faire que de faire-faire. La question n'est pas celle de la domination ou de la rébellion, mais de formes de coopération. À la place de la métaphore de l'apprenti-sorcier par vocation, on peut proposer la notion de sérendipité, ou de hasard heureux : on parlera de sérendipité lorsque l'on découvre, par accident ou par sagacité, des choses en quête desquelles on n'était pas. Lorsque l'on interroge des chercheurs (de l'Inra, notamment) et qu'on leur demande s'ils ont obtenu des résultats qu'ils n'attendaient pas - autrement dit s'ils ont été des apprentis-sorciers par vocation, ils répondent qu'il y a eu des hasards heureux. La chose n'est pas nouvelle dans la démarche scientifique (on a souvent fait voir le rôle, dans la découverte scientifique, des erreurs fécondes, qui ont conduit à des résultats inattendus et fructueux), mais la nouveauté, c'est que le hasard est inscrit au cœur même de la recherche, et que cela conduit à remettre en cause la représentation du rapport technique à la nature, en termes de domination, avec la complète prévisibilité que cela suppose. Il faut se préparer à être surpris et non faire des plans pour éviter de l'être. Il s'agit moins de maîtriser la matière que d'en faire notre interlocutrice.

On peut considérer que le chercheur engage un "dialogue singulier" avec la matière et que c'est là un élément nouveau qui permet de requalifier le projet technique, comme mode de rapport avec la nature et avec l'objet technique. Alors que la conception classique de la matière la décrivait comme fondamentalement *indéterminée* - seule l'intelligence de l'homme de science et l'art de l'artisan la dotent de déterminations soumises à ses projets -, voici que le nano-objet porte ses déterminations propres que l'homme interroge, oriente, "domestique" par le jeu d'un échange complexe d'informations. Le nano-objet agit, réagit, émet, transmet, stocke et restitue de l'information. L'interaction avec le matériau peut être caractérisée en termes de questions et de réponses, non d'ordres et d'exécution.

⁵⁰ Simondon G. (1989). *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier.

⁵¹ "Le vrai et le fait sont interchangeables" in *De l'antique sagesse de l'Italie*, de G. Vico (1710).

⁵² L'échelle d'intervention sur la matière, les propriétés fonctionnelles émergentes, les potentialités d'action sur le monde.

7•2 LES NANOTECHNOLOGIES : POLITIQUE SCIENTIFIQUE, CONSÉQUENCES ÉTHIQUES

Ce qui fait l'unité des nanotechnologies, ce n'est pas seulement leur objet⁵², mais la politique qui, liant le passé au futur, les organise en un programme mobilisateur qui les situe dans la société dans son ensemble. Elles font aussi l'objet d'un discours politique et éthique qui les présente comme un ensemble unique et spécifique. C'est vrai pour les nanotechnologies en général, comme pour celles du domaine agricole et

alimentaire. Que les nanotechnologies ne soient appréhendées dans leur unité qu'au sein d'une politique globale conduit à se poser un certain nombre de questions. Politiques, d'abord : celle du réalisme d'une telle visée. A-t-on vraiment les moyens de réaliser une telle politique (avec ce que cela implique de choix entre les possibles) ou n'est-ce pas plutôt une façon de requalifier un développement économique qui a ses propres lois ? Des questions éthiques, ensuite, qui surgissent de la façon dont sont définies les nanotechnologies, ce qui affecte aussi bien la conception que les chercheurs ont de leur travail, que la place des sciences et des techniques dans la société.

Que les nanotechnologies trouvent leur unité notamment dans un projet politique mobilisateur a pour conséquence, qu'en les présentant, on se projette constamment dans le futur. S'il est très difficile, lorsqu'il s'agit d'apprécier l'état actuel de la recherche en nanotechnologies, de distinguer entre le potentiel et l'actuel, entre l'opportunité à développer et la réalité, c'est parce que le discours des nanotechnologies est souvent celui de la promesse. La présentation ne peut pas être une simple description : c'est déjà une évaluation qui a ses méthodes de justification, à savoir la constante comparaison des coûts et des avantages, des bénéfices et des risques. "Comment aller au-delà du risque" se demande-t-on parfois ? En mettant en évidence les bénéfices, répond-on souvent. Or, l'estimation coûts/avantages ou bénéfices/risques n'est ni le seul, ni le meilleur mode d'évaluation éthique. Pour deux raisons au moins. D'une part, parce qu'elle ne prend en compte que l'efficacité d'une technique et ne permet pas de s'interroger sur la valeur, la finalité de l'action technique. D'autre part, parce qu'elle n'est rationnelle qu'en apparence : elle prend en considération des promesses, des possibilités, dont l'actualisation n'est pas prouvée. Le discours de la promesse est en effet éthiquement critiquable, car c'est un discours biaisé, qui présente ce qui peut être comme ce qui est.

La présentation politique conduit à situer les nanotechnologies dans une vision compétitive. On va considérer ainsi que le secteur agronomique utilise peu une technologie qui développe ses concepts et ses techniques principalement dans le domaine de la santé, des technologies de l'information et des nouveaux matériaux, et qu'il serait nécessaire de développer les opportunités de ces technologies aussi dans le domaine agricole. On peut craindre qu'une telle façon d'appréhender les choses ne conduise à valoriser l'innovation pour l'innovation, du seul fait qu'il y a des opportunités, sans en interroger les finalités.

Or, ces finalités existent. Elles préexistent, même. C'est le cas de l'agriculture de précision, concept élaboré depuis près d'une vingtaine d'années, qui est en recherche de technologies pouvant lui donner une réalité. À la différence de l'agriculture "productiviste", après la Seconde Guerre mondiale, qui ne cherchait qu'à maximiser des ratios bruts de quantités (plus de rendement, moyennant plus d'engrais, plus de pesticides...), l'agriculture de précision cherche à faire plus avec moins, par un contrôle plus fin des différentes étapes de la production. L'agriculture de précision, comme l'agriculture raisonnée, visent à épargner un certain nombre de ressources et à maximiser ce que l'on peut en tirer par une gestion économe, prudente et durable. Il s'agit donc d'intégrer la durabilité à l'objectif productiviste. Mais l'agriculture de précision n'est pas la seule façon de parvenir à cet objectif. Il existe d'autres façons de concilier les objectifs de production et le respect de l'environnement, notamment, dans les pays du Sud, l'agriculture écologiquement intensive (ou révolution doublement verte). Les différences entre ces modes de production agricole ne sont pas seulement techniques, elles tiennent aux conditions sociales et culturelles dans lesquelles elles peuvent intervenir : qu'il s'agisse de l'accessibilité du capital⁵³, ou qu'il s'agisse de l'accessibilité des techniques utilisées⁵⁴. Or, aujourd'hui, les défis à résoudre, notamment dans le Sud, supposent des technologies, non seulement accessibles au plus grand nombre, mais dont le financement permet en retour une répartition équitable de la valeur ajoutée. Comme l'a montré Amartya Sen⁵⁵, les pénuries alimentaires ne proviennent pas seulement d'une pénurie de ressources, le problème est d'abord celui de l'accès à la ressource. C'est pourquoi, pour indéniable que soit le rôle que joue l'innovation technique dans l'augmentation de la productivité, pour nourrir la planète, il ne suffit pas de produire plus.

Du fait que leur unité est celle d'une politique, et qu'elles sont un ensemble de pratiques qui ne s'unifient pas dans un objet préalablement donné, les nanotechnologies ne peuvent pas faire l'objet d'une éthique de

⁵³ Pour des technologies de pointe comme les nanotechnologies, le capital développement est de plus en plus issu des ressources privées, avec ce que cela implique d'exigences de retour sur investissement.

⁵⁴ La sophistication technique conduit les agriculteurs à devenir des ingénieurs.

⁵⁵ Sen A.K. (1981). Ingredients of Famine Analysis: Availability and Entitlements, *The Quarterly Journal of Economics*, 96(3): 433-464; voir aussi Sen A.K. (1981). Poverty and Famines. An Essay on Entitlement and Deprivation, Oxford; Oxford University Press.

vérité qui pourrait énoncer des règles. La recommandation est donc celle d'une éthique d'accompagnement qui invite les chercheurs à développer une nouvelle culture de l'objet, ce qui peut avoir des conséquences aussi bien dans la définition des rapports à l'intérieur de la communauté scientifique, que dans l'insertion de cette communauté et de ses projets dans la société civile.

7.2.1 Éthique pour la communauté scientifique

Il s'agit donc d'inviter les chercheurs à un travail de clarification et d'information, pas seulement à l'égard du public, mais également entre eux. Parce que les nanotechnologies n'ont pas d'objet délimité, elles sont transdisciplinaires et conduisent à des regroupements ou à des recouplements disciplinaires inattendus. Clarifier le travail, c'est aussi s'interroger sur la multiplicité des possibles, et sur le choix que cela autorise. Il s'agit de se demander si la recherche se déroule nécessairement dans une direction déterminée, ou s'il est possible de l'infléchir suivant les possibilités qui s'offrent.

7.2.2 Débat public et démocratie

Depuis la Seconde Guerre mondiale, les rapports entre les scientifiques et le grand public se sont détériorés. Comme l'a montré l'opposition européenne aux OGM, le public se trouve souvent méfiant, voire hostile, vis-à-vis des promesses des nouvelles technologies, s'interroge sur leurs finalités, et doute de la parole des experts, qui sont soupçonnés de ne pas dire quelque chose parce que c'est vrai, mais parce qu'ils y ont intégré. De leur côté, les scientifiques se méfient d'un public dont ils jugent les craintes irrationnelles et mal fondées. Ils estiment donc prioritaire d'informer le public. Mais, des études ont montré qu'un public bien informé pouvait être encore plus méfiant. À partir du moment où la science vise l'utilité sociale (et ne se règle pas seulement sur la recherche de la vérité), où la recherche est finalisée (c'est-à-dire qui s'inscrit dans des finalités politiques), l'information, certes nécessaire, ne suffit pas. La recherche scientifique et technique relève de la démocratie et du débat public. Un tel débat est difficile à organiser du fait, entre autres, du type de savoir intermédiaire qu'il suppose dans le public (un savoir profane, ou ordinaire, qui ne soit ni celui de l'expert, ni l'absence de savoir de l'ignorant). Là aussi, le souci des scientifiques de participer au débat public, doit être accompagné, de façon à faciliter les rapports entre les scientifiques et le public.

7.2.3 Conséquences

Si on prend en considération : (i) que la question n'est pas tellement celle de notre puissance d'agir que celle des objets des nanotechnologies et de la façon de les caractériser, (ii) la nature essentiellement relationnelle des nano-objets, (iii) la nature essentiellement sociale et politique des nanotechnologies, on en arrive à proposer une éthique d'accompagnement réflexif du travail des chercheurs, qui tienne compte à la fois de la place des nanotechnologies dans l'éthique de la science (liberté et responsabilité des chercheurs) et des questions éthiques posées par une politique scientifique globale (la question de l'innovation responsable).

8 ■ RECOMMANDATIONS

8•1 VEILLER AUX MODALITÉS DE DÉVELOPPEMENT DES NANOTECHNOLOGIES

L'avis du Comité est qu'il n'existe aucun obstacle éthique de principe au développement des nanotechnologies. Mais s'il n'est pas de raison éthique de les interdire, cela n'implique pas que tout soit permis pour les développer. Le chercheur a le devoir de prêter une attention constante aux conditions de développement et d'application éventuelle de la recherche. Il appartiendra donc aux directions des deux établissements de porter une attention particulière aux chercheurs concernés par le développement des nanotechnologies, non seulement en termes de prévention des risques professionnels, mais également dans l'accompagnement et l'aide à la décision, en mettant en place les moyens nécessaires pour développer leur expertise et leur apporter un éclairage sur les stratégies expérimentales à conduire.

8•2 DONNER AUX CHERCHEURS LES MOYENS DE RÉFLÉCHIR SUR LEUR RECHERCHE ET D'INTERVENIR DANS LE DÉBAT PUBLIC

L'accompagnement réflexif que préconise l'avis est complémentaire de celui évoqué dans la recommandation 8.1, dans la mesure où il pose l'importance du changement de paradigme dans la démarche scientifique. Avec les nanotechnologies, le modèle de la science et sa relation à la technique ne sont plus ceux qui ont prévalu jusqu'alors, mais on assiste à une intrication entre le savoir et le faire. La technique fait advenir de l'imprévu, qui devient objet de connaissance. L'accompagnement n'est possible que si l'on met à la disposition des chercheurs les moyens nécessaires pour mener leur réflexion à bien. Cela suppose donc des modes et des lieux pour se rencontrer et débattre : espaces éthiques, écoles-chercheurs, chercheurs en sciences humaines pour lancer et accompagner ces débats. En perspective, cet accompagnement réflexif des chercheurs les préparera à l'information de la société, aux échanges avec le public, souvent manipulé par de fausses informations et peu enclin à entendre d'autres positions.

8•3 INSÉRER LES NANOTECHNOLOGIES DANS DES PROJETS DE RECHERCHE FINALISÉE

Au même titre que d'autres technologies génériques (comme les biotechnologies), les nanotechnologies ouvrent de multiples perspectives d'application dans les domaines agronomique, alimentaire et environnemental. Comme argumenté par le présent avis, les nanotechnologies renouvellent les rapports du chercheur à la matière et à l'objet technique, ainsi que les liens entre disciplines biologiques et physiques. Ces interfaces créent de nouvelles opportunités et invitent les chercheurs à revisiter les questions qui motivent leurs travaux. Plusieurs groupes de recherche illustrent déjà cette démarche, encouragée par le Comité : affirmer ses objectifs de connaissance et d'application (valoriser les bioressources, diagnostiquer des maladies de plantes, formuler des pesticides, suivre en temps réel les besoins physiologiques des cultures, conserver les aliments, etc.), tout en appréciant les solutions techniques et les sources de connaissances auxquelles les nanotechnologies donnent accès. Les nanotechnologies ne sont pas les seules solutions technologiquement innovantes, leur développement ne peut être encouragé qu'après appréciation comparative, au regard des finalités recherchées, des autres solutions existantes, ou possibles.

Pour autant, la primauté accordée aux finalités des recherches n'exclut pas une modification substantielle du mode de finalisation de la recherche et de la place des chercheurs dans le dispositif de programmation scientifique. Puisque les chercheurs sont au plus près des possibilités que recèlent les nanotechnologies, ils sont appelés à participer plus étroitement au mode de finalisation de la recherche, à donner forme à l'innovation, qui ne serait pas uniquement déterminée par des impératifs économiques. L'organiser constitue un défi à relever par les directions des organismes. Il y en a d'autres, comme organiser la rencontre féconde entre cultures scientifiques différentes, celles des agronomes, physiciens, biologistes, informaticiens, mathématiciens, etc., et promouvoir les interfaces où s'épanouissent les nanotechnologies. Ces interfaces rapprochent des disciplines différentes, mais aussi des institutions d'enseignement supérieur et de recherche différentes, avec lesquelles les équipes de l'Inra et du Cirad n'ont pas nécessairement des traditions de collaboration. Un troisième défi sera d'assurer la coexistence harmonieuse entre façons de penser la recherche et l'innovation, entre ceux qui s'inscrivent dans une approche conventionnelle de la recherche finalisée ("de la connaissance à l'application", en mobilisant une séquence d'acteurs traditionnels) et ceux qui participent d'un nouveau mode d'innovation, qui voit l'objet technique - l'artefact nanotechnologique - être simultanément objet de connaissance et instrument d'intervention finalisée sur le réel⁵⁶.

8•4 CONTRIBUER À L'UTILISATION PERTINENTE DES NANOTECHNOLOGIES, DANS LES PAYS DU SUD COMME DU NORD

Tous les pays, du Sud comme du Nord, sont concernés, à des degrés divers, par les nanotechnologies, pas seulement par les effets d'une économie mondialisée, mais directement par les opportunités créées face aux impératifs propres à leur développement. Parmi les applications à l'agriculture et l'alimentation, certaines

⁵⁶ L'un des chercheurs interrogés par les rapporteurs du présent avis parle de "recherche interactive avec son objet d'étude".

semblent intéresser davantage les agricultures du Sud, comme de nouvelles générations de fertilisants et d'amendements des sols, de systèmes de nano-filtration et de décontamination des eaux, ou encore de nouvelles méthodes de conservation des aliments. Le projet d'une intensification écologique de la production agricole dans les pays en développement, priorité de la recherche agronomique internationale, peut tirer parti des nanotechnologies dans la recherche d'une productivité respectueuse des ressources de l'environnement. Un engagement précoce, à visée anticipatrice, des autorités publiques dans les nanotechnologies apparaît comme une condition à l'orientation du secteur vers les priorités de leurs pays. Devant cette double complexité, celle de l'intensification écologique de l'agriculture et celle des nanotechnologies, la mise en place d'une politique de formation des chercheurs et des cadres de la recherche agronomique paraît essentielle. Cette formation pourrait compter sur les Centres de recherche et d'enseignement agronomiques existants, nationaux et internationaux, sans nécessairement créer de nouveaux centres ou instituts. Des nanoproduits, destinés notamment à l'amélioration de la qualité des sols et des eaux, à de nouvelles formulations de pesticides et de fertilisants, à des outils de *monitoring* des cultures et des produits de récolte pourraient y être développés, tirant parti des réseaux de partenaires déjà mobilisés pour le transfert et la vulgarisation d'autres innovations agricoles et agro-alimentaires. Le développement et l'utilisation de tels produits nécessitent la mise en place d'un cadre légal et réglementaire prenant en charge les risques et les incertitudes, dès les premiers stades de l'innovation et à travers toute la filière supportant le cycle de vie du produit. Une coopération entre la recherche agronomique et les autorités publiques sanitaire et environnementale doit donc être encouragée.

Le Comité recommande au Cirad et à l'Inra de mobiliser ses chercheurs sur ces objectifs de recherche et d'innovation, de formation, et d'analyse des risques. Leur statut et leur expertise en font des partenaires privilégiés des pays du Sud et du secteur public désireux de s'engager dans les nanotechnologies de façon responsable. Dans cette tâche, le Comité recommande d'insérer les nanotechnologies dans des projets d'application argumentés, en accord avec leur vocation de recherches finalisées. L'accent devrait être porté sur l'identification de la pertinence des applications nanotechnologiques dans des contextes concrets, au regard de l'ensemble des options techniques disponibles, traditionnelles ou issues de la recherche agronomique, tenant compte de leurs impacts à long terme.

8•5 S'ENGAGER DANS L'ÉVALUATION ET LA GESTION DES RISQUES

Les propriétés recherchées à l'échelle nanométrique - de nouvelles capacités d'interaction liées à la très petite taille et aux propriétés de surface - sont celles qui mettent en difficulté la caractérisation des dangers, de l'exposition et des risques. Il revient aux chercheurs œuvrant dans le champ des nanotechnologies de prendre une part active au développement des méthodes et des protocoles d'évaluation des risques, car ils sont les premiers à disposer des connaissances et des outils analytiques nécessaires. Diverses initiatives internationales sont en cours, en matière de définition et d'harmonisation des procédures d'évaluation (EFSA, OCDE, etc.), permettant d'accueillir les compétences des chercheurs de l'Inra et du Cirad, pour peu qu'ils aient le soutien de leurs directions, ce qu'il faut encourager. S'agissant des produits destinés à l'agriculture et à l'alimentation, l'évaluation et la gestion des risques nécessiteront un engagement fort et ouvert des filières industrielles, dans la mesure où il n'y a de sens à étudier les risques que selon une perspective réaliste qui prenne en compte la totalité du cycle de vie des produits. Les étapes de conception, fabrication, distribution et recyclage de ce cycle de vie suscitent en effet des problématiques différentes. Les dispositifs de surveillance des risques, indispensables dans de tels contextes d'incertitude, ne se conçoivent pas sans mobilisation des acteurs économiques et de la société civile, avec lesquels l'Inra et le Cirad ont une tradition de collaboration. Ils ont donc une responsabilité particulière à ce niveau.

8•6 APPLIQUER LES RÈGLES DE SÉCURISATION DES CONDITIONS DE TRAVAIL DES CHERCHEURS

Dans l'expérimentation à l'échelle nanométrique, les chercheurs de l'Inra et du Cirad développent des protocoles de recherches, permettant de respecter les règles classiques de sécurisation des conditions de travail,

énoncées dans le document unique propre à chaque unité de recherche. Le Comité recommande de mettre à jour, y compris en les modifiant profondément, les pratiques de sécurisation des conditions opératoires, compte tenu de la manipulation d'objets à la taille nanométrique. Parce que l'imprévisibilité des résultats constitue l'une des caractéristiques des recherches sur les nanotechnologies, le Comité recommande vivement aux chercheurs d'adopter une attitude de vigilance continue, évitant de banaliser des règles de sécurisation des conditions de travail appliquées dans d'autres contextes.

8•7 CONTRIBUER À UNE JUSTE PERCEPTION DES NANOTECHNOLOGIES PAR LE CITOYEN

Le discours sur les nanotechnologies est déformé par l'engouement autour de l'approche dite "ascendante" (*bottom up*) de construction de nano-objets, "atome par atome", quand il ne s'agit pas de fantasmes autour de nanorobots auto-répliquants, inexistant à ce jour. S'y ajoutent des propos futuristes embarquant les nanotechnologies dans de nouvelles utopies, comme celle, "*enhancement of human performance*", du projet NBIC aux États-Unis ou de projets transhumanistes, qui achèvent d'accaparer l'attention du public et des médias. À ce jour, les nanotechnologies ont contribué à la mise sur le marché de plus d'un millier de produits, principalement dans les domaines de la chimie industrielle, de l'électronique, des cosmétiques et de la santé, moins dans le domaine alimentaire, à travers le génie des procédés, les techniques de conservation et d'emballage des aliments. Les produits sur les marchés sont simples⁵⁷, bien loin de nanomachines auto-répliquantes. Il est regrettable que des fictions technologiques masquent les projets concrets, tels que les développent les chercheurs de l'Inra et du Cirad, et nuisent à une appréciation objectivement fondée des nanotechnologies. Le danger existe de biaiser durablement le dialogue citoyen sur ces technologies en le focalisant sur des scénarios d'avenir contestables, voire improbables, et de favoriser une polarisation du débat entre technophiles et technophobes. Il y a donc une responsabilité des chercheurs et des organismes à parler, de façon ouverte, des risques et des incertitudes, tout autant que des perspectives qu'offrent les nanotechnologies, à mettre en évidence ce que sont aujourd'hui les nanotechnologies dans leurs laboratoires, des finalités qu'elles contribuent à poursuivre. Expliquer ce qui se fait avant de spéculer sur ce qui pourrait se faire.

L'avis a été adopté⁵⁸
par le Comité, le 16 mars 2012.

⁵⁷ Nanoparticules d'or, d'argent, d'oxydes de zinc ou de titane, nanotubes de carbones, nano-liposomes, etc.

⁵⁸ Un avis minoritaire a été exprimé et figure en annexe 2.

Annexe 1

QUESTION POSÉE PAR LES PRÉSIDENTS DE L'INRA ET DU CIRAD, LORS DE LA SÉANCE DU 22 JANVIER 2010

L'ORIENTATION ET LA CONDUITE DES RECHERCHES FAISANT APPEL AUX NANOSCIENCES ET AUX NANOTECHNOLOGIES : QUELLES QUESTIONS ÉTHIQUES DANS LES CHAMPS COUVERTS PAR L'INRA ET LE CIRAD ?

Les sciences et technologies à l'échelle nanométrique suscitent des débats de nature scientifique, éthique et sociale, que ce soit dans le domaine des matériaux, des technologies de l'information, de la santé, de l'énergie... En ce qui concerne plus particulièrement les domaines de recherche de l'Inra et du Cirad, ces débats se développent à travers le Grenelle de l'environnement, le Conseil national de l'alimentation, ou depuis quelques semaines dans le cadre du débat public sur les grandes orientations en matière de nanotechnologies.

L'échelle nanométrique des phénomènes observés par la recherche ou des objets manipulés n'est certes pas en soi complètement nouvelle. Pour les scientifiques du vivant, l'échelle de la molécule est banale, mais plusieurs aspects des nanosciences et nanotechnologies peuvent amener à les considérer comme une nouvelle phase dans l'évolution des sciences et technologies, appelant des questionnements éthiques et épistémologiques spécifiques. Envisageant des objets d'emblée à une échelle nanométrique, et non comme simple fraction d'un objet déjà connu à une échelle macroscopique, les nanosciences et nanotechnologies apparaissent souvent associées à une approche *bottom-up* de la matière et du vivant, voire à une "mécanisation de l'esprit", qui participent à un brouillage des frontières entre science et technique, entre nature et artefact, entre inerte et vivant.

Elles contribuent également à un renouvellement des relations entre sciences et technologies: alors que les technologies s'appuient généralement sur les avancées antérieures des sciences, les nanotechnologies, en tant que fabrication de nano-objets en vue d'obtenir des propriétés différentes de celles connues à l'échelle macroscopique, précèdent les nanosciences qui étudient les mécanismes nouveaux et imprévisus ainsi apparus.

Le développement des nanosciences et nanotechnologies repose finalement sur une situation paradoxale: l'aspiration à maîtriser la matière et les systèmes vivants aux échelles les plus petites conduit à la production d'objets aux propriétés nouvelles et imprévisibles, avec un déficit important de connaissances par la société sur les fonctions utiles de ces objets, les risques⁵⁹ qu'ils induisent, leur cycle de vie, etc. Ils paraissent donc de nature à susciter des réactions comparables à celles qui se sont exprimées vis-à-vis d'objets nouveaux mal connus tels que les OGM, pour des applications qui toucheraient l'alimentation ou les milieux anthropisés.

Une forme d'engouement de la communauté scientifique s'est développée autour des nanotechnologies et nanosciences, à la fois alimentée par des innovations et des perspectives foisonnantes, associées à des dynamiques industrielles et à des transformations du monde, et accompagnée d'une mobilisation massive de moyens financiers publics et privés. Cette dynamique interroge la capacité de la communauté scientifique et des organismes de recherche à développer un regard suffisamment distancié sur les perspectives offertes par ces domaines et sur les niveaux d'investissement qui y sont consacrés.

Dans un tel contexte, comment réfléchir aux bouleversements conceptuels et disciplinaires que peuvent induire les nanosciences et les nanotechnologies dans les domaines de recherche finalisée portés par l'Inra et le Cirad? Des débats éthiques ont déjà été menés à l'initiative de différents organismes (CNRS, BBSRC, UNESCO...); ils apportent un éclairage général sur ces questions, mais abordent peu les domaines de

⁵⁹ À l'opposé d'une innovation "responsable" où les risques sont pris en compte en amont de la recherche.

l'alimentation, de l'agriculture ou de l'environnement. Ces domaines apparaissent, en effet, peu présents ou peu visibles parmi les applications des nanotechnologies, qui semblent surtout toucher des matériaux ou équipements, des dispositifs électroniques, ou encore des dispositifs de santé⁶⁰. Toutefois, une étude publiée dans *PLoS Medicine*⁶¹ fait apparaître l'agriculture, l'eau, les produits alimentaires et les parasites parmi les dix applications principales des nanotechnologies qui pourraient contribuer à répondre aux objectifs du Millénaire pour le Développement.

Au-delà des réflexions éthiques déjà menées par d'autres instances sur les nanosciences et nanotechnologies, quelles sont les questions éthiques particulières soulevées par des applications dans le champ de l'alimentation, l'environnement ou l'agriculture ?

Dans ces domaines, le changement d'échelle, qui caractérise les nanosciences et nanotechnologies, et la "convergence" entre nanotechnologies, biotechnologies et technologies de l'information, pose-t-il des questions éthiques spécifiques ?

Pour les applications s'appuyant sur les nanotechnologies, selon quels critères choisir les domaines et les fonctionnalités sur lesquels porter l'effort de recherche et d'innovation dans le cadre de la recherche agronomique ? Quelle démarche réflexive pour concilier vérification des hypothèses ou promesses de fonctionnalités, critères de choix de celles-ci, caractère imprévisible des propriétés des nanomatériaux ? Les caractéristiques des nanotechnologies appellent-elles une réflexion éthique particulière sur les partenariats avec les acteurs socio-économiques et le partage de la connaissance, y compris dans le cadre de relations Nord-Sud ? Sur les modalités de dialogue avec la société ? Sur les finalités et impacts de la recherche agronomique (par exemple, par des produits de substitution aux produits actuels) ?

Enfin, dans quelle mesure les questions soulevées à propos des nanosciences et nanotechnologies justifient-elles d'un élargissement pour aborder d'autres objets ou champs de recherche, comme la biologie synthétique, qui effacent les frontières entre biologie et physique, induisant des effets comparables, voire renforçant réciproquement leurs effets ?

⁶⁰ Au niveau national, le Grand Emprunt inclut, dans son volet "biotechnologies et santé", une intensification de l'effort sur les nanotechnologies, dans le champ de la santé et des biotechnologies, et la mise en place de plates-formes de transfert de technologie. En ce qui concerne les recherches au sein de l'Inra et du Cirad, quelques projets de recherche portent sur des nano-objets et d'autres font appel aux nanotechnologies comme outils de connaissance fine pour la compréhension des organismes vivants.

⁶¹ Salamanca-Buentello, F., Persad, D.L., Court, E.B., Martin, D.K., Daar, A.S. et Singer, P.A. (2005). Nanotechnology and the developing world. *Plos Medecine*, 2(5): e97.

Annexe 2

AVIS EXPRIMÉ PAR GÉRARD TOULOUSE⁶²

Cet Avis sur les nanotechnologies contient des informations et références utiles, dont certains lecteurs feront leur miel, sans état d'âme. Fort bien.

Cependant mon expérience, acquise notamment dans les sphères universitaires (recherche fondamentale) ou citoyennes (milieu associatif, initiatives science-et-société), me permet de prédire que nombre de collègues et partenaires, si ce rapport leur parvient, en seront insatisfaits. Leurs objections porteront sur le fond et la forme (ton et style) et seront d'ordre intellectuel et moral. Je crois important de mentionner que notre Comité n'était pas unanime, et les raisons de ma dissidence.

1. Ce rapport fait trop l'impasse sur les nanosciences, et leur dynamique propre.

Certes, dans ce domaine, la symbiose entre sciences et techniques est telle que la norme internationale est de les regrouper dans le terme "nanotechnologies", et je suis favorable à ce regroupement sous un seul terme. Encore faut-il bien garder en considération ce qui se fait dans les communautés agissant au sein des trois grandes disciplines des sciences naturelles : physique, chimie, biologie (reconnues notamment par les prix Nobel). La convergence physique-chimie-biologie, à l'échelle nano, est une composante majeure dans l'avènement des nanotechnologies.

Ignorer cette évolution spontanée de la recherche scientifique conduit à occulter la forte dynamique sous-jacente dans le processus de miniaturisation, depuis plus d'un demi-siècle. Et à marteler, contre toute évidence, la thèse que 'les nanotechnologies ne sont appréhendées dans leur unité qu'au sein d'une politique globale'. Le mot 'politique' ayant plusieurs acceptations, cela peut signifier une banalité (ce qui se passe dans la cité) ou un propos outrancier, niant la part d'autonomie des sciences et des arts.

2. Qu'il y ait des liens entre sciences, techniques et politiques depuis toujours, qu'il soit intéressant d'étudier la façon dont ces liens évoluent au cours des âges, que cela mérite attention et réflexion au sein des Comités d'éthique, certes et mille fois certes.

Mais si les rédacteurs de cet Avis avaient permis à leurs lecteurs de discerner d'abord, derrière les annonces politico-médiatiques (qui ne sont parfois que l'écume des choses), les sources profondes des évolutions scientifiques et techniques, ils auraient pu ensuite mettre en perspective les programmes Nanotechnologies, au regard d'une série d'autres grands projets mobilisateurs du passé : projet Manhattan, rapport de Vannevar Bush (Science, the endless frontier), projet Apollo de Kennedy, plan cancer de Nixon, guerre des étoiles de Reagan, Centre mondial informatique de Mitterrand, projet Hermès de Chirac, projet HUGO (human genome organisation), ce dernier mieux inspiré que les quatre précédents.

3. Au-delà de la divergence des analyses sur les nanotechnologies, je voudrais avancer ici quelques idées sur le rôle d'un Comité d'éthique comme le nôtre.

Pour toute institution, créer un Comité d'éthique vise à inspirer confiance, et chaque membre du Comité doit s'efforcer de mériter cette confiance souhaitée. La délibération pluraliste collective a une fonction d'antidote (honnête, respectable, pacifiant) aux pressions de conformité professionnelle, accrues dans les secteurs compétitifs de la recherche et de l'innovation.

En découle un devoir de bienveillance envers les jeunes commençants, dont le sort est souvent difficile, et de sollicitude pour les exigences spécifiques de la recherche finalisée. Surtout, ne pas couper les jeunes des sources de noblesse et de fierté du métier de chercheur, que recèle l'histoire longue des sciences et techniques, de Galilée à Sakharov (entre autres).

⁶² Membre du Comité consultatif commun d'éthique pour la recherche agronomique.

RÉSUMÉ DE L'AVIS SUR LES NANOSCIENCES ET LES NANOTECHNOLOGIES

L'originalité des objets des nanotechnologies provient moins de leur taille (de l'ordre du millionième de millimètre) que des effets associés à la dimension nanométrique, effets développant des fonctionnalités particulières que l'on va recruter aux fins de nouvelles applications. Si l'homme utilise des nanomatériaux depuis longtemps, les nanotechnologies sont nées de la capacité à observer les nanostructures à l'échelle atomique, ainsi qu'à modifier ou à créer des formes nanométriques et des nano-objets, grâce aux développements techniques que sont les microscopes à effet tunnel et à force atomique. Deux approches, l'une qualifiée d'ascendante (*bottom up*) permettant d'assembler ces nano-objets, l'autre, descendante (*top down*), procédant plutôt par miniaturisation, opèrent pour exploiter les fonctions particulières des nanostructures. À cette échelle, l'imbrication entre savoirs et savoir-faire est telle que la distinction entre nanosciences et nanotechnologies devient artificielle, le Comité entendant à travers "nanotechnologies" la profonde continuité qui prévaut au sein des sciences fondamentales et des technologies.

Le Comité a dressé un panorama des applications avérées et potentielles des nanotechnologies dans le domaine de l'agriculture et de l'alimentation, y compris dans les pays du Sud, tout en identifiant plusieurs difficultés dans cette démarche, liées à la définition même des nanoproduits, à l'incertitude entourant leurs développements industriels ou à l'insuffisance des cadres réglementaires qui les régissent. S'appuyant sur l'analyse des pratiques à l'Inra et au Cirad, le Comité a souligné le caractère pluridisciplinaire des recherches qui visent notamment à exploiter de nouvelles interfaces, entre sciences physiques et biologiques, entre sciences fondamentales et sciences de l'ingénieur. Par les nanotechnologies, le chercheur développe de nouveaux rapports avec le matériel biologique (y compris les produits de l'agriculture) : à l'exploitation des propriétés que l'approche "descendante" met à jour (propriétés optiques, électriques, magnétiques, catalytiques, etc.), s'ajoute l'approche "ascendante", désignant l'assemblage maîtrisé de nanostructures dites "biomimétiques" ou "bio-inspirées", lorsqu'elles imitent ou s'inspirent des systèmes biologiques. Les nanotechnologies ne procèdent pas d'une volonté d'obtenir une meilleure représentation de la nature. La motivation semble beaucoup plus pragmatique : l'accès à une échelle de grandeur ouvre un éventail de phénomènes et de possibilités à exploiter, qui sont démultipliés par l'existence d'une convergence entre plusieurs secteurs de recherche. Les nanotechnologies ne remettent donc pas en cause directement les catégories à l'aide desquelles nous pensons le monde, mais celles avec lesquelles nous pensons notre rapport au monde, notre façon d'agir dans le monde, notre mode d'agir technique.

Frappé par le décalage important entre le discours tenu à propos des nanotechnologies et les pratiques effectives menées par les chercheurs dans leurs laboratoires, le Comité s'est interrogé sur ce qui fait l'unité des nanotechnologies et comment on peut y situer les pratiques en cours. Les nanotechnologies sont indissociables de projets politiques fédérateurs et mobilisateurs, avec comme conséquence une projection constante dans le futur, le discours sur les nanotechnologies étant souvent celui de la promesse, critiquable sur le plan éthique. Les nanotechnologies faisant émerger des propriétés inconnues et imprévisibles, la question des risques doit être abordée avec soin. Cependant, la démarche éthique ne se réduit pas à l'appréciation des risques et de leurs conséquences pour l'action. Du fait que l'unité des nanotechnologies est principalement liée à celle d'une politique, elles ne peuvent pas faire l'objet d'une éthique prescriptive qui énonce des règles. La recommandation du Comité est donc celle d'une éthique d'accompagnement réflexif du travail des chercheurs qui les invite à développer une nouvelle culture de l'objet, avec des conséquences aussi bien dans la définition des rapports à l'intérieur de la communauté scientifique, que dans l'insertion de cette communauté et de ses projets dans la société civile. Cela implique une prise en compte à la fois de la place des nanotechnologies dans l'éthique de la science (liberté et responsabilité des chercheurs) et des questions éthiques posées par une politique scientifique globale (la question de l'innovation responsable).

RECOMMANDATIONS

1• Veiller aux modalités de développement des nanotechnologies

Il n'existe aucun obstacle éthique de principe au développement des nanotechnologies, mais, cela n'implique pas que tout soit permis pour les développer. Le chercheur a le devoir de prêter une attention constante aux conditions de développement et d'application éventuelle de la recherche. Il appartiendra aussi aux directions des deux établissements de porter une attention particulière aux recherches concernées par le développement des nanotechnologies.

2• Donner aux chercheurs les moyens de réfléchir sur leur recherche et d'intervenir dans le débat public

L'accompagnement n'est possible que si l'on met à la disposition des chercheurs les moyens nécessaires pour mener leur réflexion à bien. Cela suppose donc des modes et des lieux pour se rencontrer et débattre : espaces éthiques, écoles-chercheurs, mobilisation des chercheurs en sciences humaines pour lancer ces débats.

3• Insérer les nanotechnologies dans des projets de recherche finalisée

Au même titre que d'autres technologies génériques, les nanotechnologies ouvrent de multiples perspectives d'application dans les domaines agronomique, alimentaire et environnemental et renouvellent les liens entre disciplines biologiques et physiques, créant des interfaces engendrant de nouvelles opportunités. Organiser la rencontre féconde entre cultures scientifiques différentes, penser la place des chercheurs dans le dispositif de programmation scientifique et dans le mode de finalisation de la recherche, assurer la coexistence entre les façons de penser la recherche et l'innovation, constituent autant de défis pour les directions.

4• Contribuer à l'utilisation pertinente des nanotechnologies, dans les pays du Sud comme du Nord

Les pays du Nord, comme ceux du Sud, sont concernés par les nanotechnologies, pas seulement par les effets indirects d'une économie mondialisée, mais directement par les opportunités créées face aux impératifs propres à leur développement. Le Comité recommande d'argumenter l'insertion des nanotechnologies dans des projets de recherche, en qualifiant la pertinence des applications nanotechnologiques dans des contextes concrets, au regard de l'ensemble des options techniques disponibles, traditionnelles ou issues de la recherche agronomique, tenant compte de leurs impacts à long terme.

5• S'engager dans l'évaluation et la gestion des risques

Il revient aux chercheurs œuvrant dans le champ des nanotechnologies de prendre une part active au développement des méthodes et des protocoles d'évaluation des risques, car ils sont les premiers à disposer des connaissances et des outils analytiques nécessaires pour évaluer le cycle de vie des nanomatériaux, incluant les étapes de conception, fabrication, distribution et recyclage.

6• Appliquer les règles de sécurisation des conditions de travail des chercheurs

Le Comité recommande aux chercheurs de mettre à jour, y compris en les modifiant profondément, les pratiques de sécurisation des conditions opératoires, compte tenu de la manipulation d'objets à taille nanométrique.

7• Contribuer à une juste perception des nanotechnologies par le citoyen

Le danger existe de biaiser durablement le dialogue citoyen sur ces technologies en le focalisant sur des scénarios d'avenir contestables, voire improbables. Il y donc une responsabilité des chercheurs et des organismes à expliquer ce qui se fait avant de spéculer sur ce qui pourrait se faire, à mettre en évidence ce que sont aujourd'hui les nanotechnologies dans leurs laboratoires, des finalités qu'elles contribuent à poursuivre.



Institut National de la Recherche Agronomique (Inra)
147, rue de l'Université 75338 Paris Cedex 07

http://www.inra.fr/l_institut/organisation/l_ethique



Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (Cirad)
42, rue Scheffer 75116 Paris

<http://www.cirad.fr/qui-sommes-nous/le-cirad-en-bref/notre-organisation/comite-consultatif-commun-d-ethique>