

Pour un développement responsable des nanotechnologies

Le XXI^e siècle sera-t-il celui d'une révolution industrielle – voire des modes de vie – induite par les nanotechnologies ? Issues des progrès de la connaissance de la matière à l'échelle du milliardième de mètre (10^{-9} m), et de la possibilité de la manipuler, les nanotechnologies ont un caractère extrêmement hétérogène, mobilisant des disciplines scientifiques très variées au sein de la physique, de la chimie, de la biologie ou encore des sciences de l'ingénieur. Sources d'évolutions discrètes et potentiellement de ruptures technologiques, elles concernent tous les secteurs d'activité et pourraient générer des marchés considérables. Si leur développement est récent (début des années 2000), de nombreux pays ont investi massivement dans la R & D, se livrant une intense concurrence internationale. Mais les incerti-

tudes sont à la hauteur des espoirs fondés sur ces nouvelles technologies. Certaines applications, s'appuyant sur l'utilisation de nanomatériaux, engendrent des risques de toxicité pour la santé et l'environnement. Les nanotechnologies de générations plus avancées, à l'interface avec la biologie ou les technologies de l'information, soulèvent des questions éthiques, qui nécessitent d'être prises en compte en amont de leur diffusion. Comment assurer un développement harmonieux et cohérent de ces technologies au service de la société ? Parmi les éléments de réponse, il apparaît de plus en plus clairement que la qualité de l'innovation dépendra de celle de la gouvernance, et de notre capacité à encadrer collectivement le développement des nanotechnologies. ■

PROPOSITIONS

- 1 À l'exemple d'un certain nombre de pays (Allemagne, États-Unis, etc.), bâtir un plan d'action stratégique pour structurer et expliciter une politique de développement responsable des nanotechnologies en France.
- 2 Soutenir le développement d'un observatoire européen, voire mondial, du développement des nanotechnologies et de leurs différents impacts.
- 3 Associer le public et l'ensemble des parties prenantes en amont et tout au long du développement des nanotechnologies.
- 4 Préparer aujourd'hui la compétitivité de demain en développant une "filière intégrée" des nanotechnologies.
- 5 Prévenir les risques sanitaires et environnementaux selon trois axes : stabilisation des matériaux dès leur conception, mesure et traçabilité des nanoparticules, maîtrise de l'exposition.

LES ENJEUX

Depuis une dizaine d'années, les nanotechnologies connaissent un essor considérable à l'échelle mondiale, qui s'accompagne d'une inflation des discours sur les promesses et les craintes qu'elles génèrent. Nouvelle révolution industrielle ayant la capacité d'améliorer notre futur pour certains, menace sur la condition humaine pour d'autres, il est bien souvent difficile de faire la part des choses pour une majorité de citoyens globalement peu au fait des enjeux. Technologies transversales concernant tous les secteurs d'activité, elles bénéficient depuis plusieurs années d'investissements massifs en R & D de la part de nombreux pays. Mais les questions qu'elles soulèvent sont nombreuses et essentielles à leur développement : comment gérer les risques sanitaires et environnementaux liés aux nanoparticules ? Quelles questions éthiques renouvellent-elles ? Comment en assurer un développement responsable ?

Cette note a pour objectif de dresser un court état des lieux des enjeux liés aux nanotechnologies, suivi de quelques pistes pour alimenter la réflexion sur ce que pourrait être un développement responsable de ces technologies émergentes.

LES NANOTECHNOLOGIES : DE QUOI PARLE-T-ON ?

Une définition non stabilisée, mais pourtant indispensable

Ces dernières années ont vu le terme "nanotechnologies", parfois abrégé en "nanos", utilisé de plus en plus fréquemment, sans qu'une définition claire et unique ne fasse consensus. On entend en général par nanosciences l'ensemble des recherches et des connaissances visant à comprendre et utiliser les propriétés physiques, chimiques et mécaniques nouvelles, induites par le passage de la dimension des objets à l'échelle du milliardième de mètre⁽¹⁾. Les nanotechnologies, quant à elles, regroupent les instruments, les techniques de fabrication et les applications dérivées exploitant les phénomènes spécifiques liés à cette échelle nanométrique. Cependant, depuis le premier emploi en 1974 par un chercheur japonais du terme "nanotechnologies", son contenu a fortement évolué et s'est largement "brouillé", chaque acteur ayant une vision particulière de ce que sont les nanotechnologies, que l'on soit un scientifique ou non, parmi les scientifiques eux-mêmes, ou que l'on soit un régulateur, une entreprise ou une association de défense de l'environnement. Afin d'éviter de se transformer en une véritable "tour de Babel", le champ très hétérogène des nanotechnologies doit pouvoir reposer sur un ensemble de définitions opérationnelles. La pré-normalisation en cours au sein des instances de normalisation internationales (ISO) et nationales (AFNOR) vise à établir un langage commun aux différents acteurs et aux différents pays. Ce langage commun est un prérequis indispensable au développement et à la régulation des nanotechnologies : écriture et adaptation des cadres juridiques (révision de la réglementation Reach⁽²⁾ pour son application effective aux nanomatériaux⁽³⁾), rationalisation de la production industrielle, agrément de leurs produits pour les entreprises, règlement de contentieux, etc. Si beaucoup reste à faire pour définir, décrire et nommer le nanomonde, la nomenclature concernant notamment les nanomatériaux a déjà largement progressé⁽⁴⁾.

Des nanosciences aux nanotechnologies

Dans les années 1980, les progrès de la microscopie (avec la découverte du microscope à effet tunnel en 1981) ont permis d'observer la matière à une résolution inédite, celle de l'atome (soit 0,1 nm). À cette échelle,

[1] Ordre de grandeur de la distance entre deux atomes dans une molécule.

[2] Réglementation européenne sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et la restriction des produits chimiques.

[3] Les nanoparticules échappent à ce jour largement à la réglementation Reach, car elles sont bien souvent produites en quantités inférieures au seuil de production d'une tonne par an entraînant une obligation d'étude de toxicité.

[4] Premier document ISO publié le 15 août 2008 : "Nanotechnologies – Terminologie et définitions relatives aux nano-objets : nanoparticules, nanofibres et nanofeuillets", ISO/TS 27687. Un nano-objet est ainsi défini comme ayant une ou plusieurs dimensions d'échelle nanométrique, une nanoparticule a 3 dimensions d'échelle nanométrique, une nanofibre 2, un nanofeuillet 1.

la matière peut présenter des propriétés particulières, éventuellement différentes de celles des mêmes matériaux aux échelles supérieures : résistance mécanique, réactivité chimique, conductivité électrique ou propriétés optiques. De nouveaux agencements – jusqu’alors inconnus – des molécules de carbone ont ainsi été découverts à cette époque : fullerène en 1985 (60 atomes de carbone agencés en forme de ballon), nanotubes de carbone en 1991 (feuillettes d’atomes de carbone formant des tubes creux) ou encore graphène (cristal monoplan de carbone) en 2004. Cette dernière forme d’agencement du carbone semble présenter un potentiel d’applications considérable (notamment en remplacement du silicium en électronique). Peu à peu, les recherches ont rendu possibles non seulement l’observation, mais aussi le contrôle et l’utilisation de ces propriétés particulières de la matière à l’échelle nanométrique. Des matériaux aux propriétés intéressantes, parfois inédites, ou spectaculairement modifiées ont ainsi émergé (encadré 1).

(Une nouvelle révolution industrielle ?

Les nanotechnologies ne peuvent être rattachées à une discipline scientifique donnée. Ce qu’elles couvrent traverse les frontières traditionnelles entre la physique, la chimie, la biologie, les mathématiques, les technologies de l’information et l’ingénierie. Elles peuvent être considérées en quelque sorte comme une “boîte à outils” permettant des modifications de procédés et produits, allant d’une simple évolution (modification des propriétés physiques d’un matériau par l’incorporation de nanoparticules) à de véritables ruptures technologiques (nanocapteurs sensoriels inspirés de la biologie).

Leurs applications potentielles sont extrêmement diversifiées, depuis la nanoélectronique jusqu’à la vectorisation des médicaments. Ce qui unifie ce champ hétérogène est la mobilisation progressive des capacités de manipulation de la matière à l’échelle nanométrique dans de très nombreuses disciplines scientifiques. Cela confère aux nanotechnologies une nature “horizontale”, c’est-à-dire irriguant potentiellement de très nombreux secteurs industriels et économiques. Leurs capacités transformatrices⁽⁵⁾ amènent certains à considérer qu’elles seront à l’origine d’une véritable “révolution industrielle” du XXI^e siècle.

Il est particulièrement complexe de brosser le paysage des applications issues des nanotechnologies, à la fois en raison de leur grande diversité et de l’absence – pour le

moment – de classification et d’inventaire systématique. On peut cependant constater que se dégagent des familles reliées par des préoccupations et des objets similaires : les nanotechnologies appliquées aux technologies de l’information et de la communication, les nanomatériaux et la nanobiologie/nanomédecine.

Encadré 1

Un panorama (non exhaustif) des nanotechnologies

Les nano-objets sont utilisés soit en tant que tels (par exemple comme catalyseurs pour les réactions chimiques, ou comme vecteurs pour transporter des médicaments vers les cellules cibles), soit en vue d’élaborer des nanomatériaux⁽⁶⁾.

Les innovations techniques actuelles dans le domaine des nanotechnologies reposent à 70 % sur l’amélioration des propriétés des matériaux. Elles concernent tous les secteurs industriels, et visent de nombreux objectifs : allègement et renforcement (pour les transports notamment), propriétés de surface particulières (résistance, hydrophobie, adhérence, etc.). On voit apparaître :

- des matériaux nanorenforcés : incorporation de nanotubes de carbone dans les équipements de sport pour modifier les propriétés comme les rapports résistance/poids ;
- des matériaux nanostructurés en surface : par exemple des revêtements à base de nitrure de titane permettant d’augmenter la durée de vie des outils de coupe, ou des revêtements antibactériens de nanoparticules d’argent ;
- des matériaux nanostructurés en volume : membranes céramiques nanoporeuses pour filtrer l’eau notamment.

Dans le domaine de l’énergie, l’utilisation de surfaces nanostructurées pourrait permettre l’amélioration des rendements des panneaux solaires. Des gains d’autonomie sont également possibles pour les batteries, grâce à l’utilisation d’électrodes conçues à l’échelle nanométrique.

Dans le domaine de la santé, de très nombreuses applications sont en développement, concernant notamment le diagnostic et le traitement. Les “*lab-on-a-chip*” (laboratoires sur puces) permettent de détecter avec une seule goutte de sang un nombre considérable de molécules, autorisant un diagnostic plus rapide et à moindre coût. La vectorisation de médicaments, qui consiste à intégrer ces derniers dans une structure moléculaire (par exemple un liposome) afin d’en améliorer l’efficacité, a d’ores et déjà trouvé des applications dans le traitement de certains cancers résistants, et des recherches sont en cours pour améliorer encore la spécificité de ces vecteurs.



[5] Aptitude à transformer les usages et les comportements ; internet est un exemple de technologie à capacité transformatrice.

[6] Tous matériaux possédant une ou plusieurs dimensions internes ou externes à l’échelle nanométrique.

La microélectronique est entrée dans le monde des nanotechnologies en 2003, lorsque la finesse des motifs imprimés dans les circuits intégrés est passée sous la barre des 100 nm. La miniaturisation continue permet aujourd'hui de produire des transistors avec des épaisseurs de gravure de 22 nm. Au-delà de cette approche *top down*, la nanoélectronique pourrait radicalement renouveler les supports d'information, en développant notamment des systèmes de codage fondés sur des phénomènes purement quantiques [par exemple codage des informations grâce au spin des électrons]. Cette nouvelle électronique moléculaire est actuellement au stade de la recherche fondamentale.

LE PAYSAGE INTERNATIONAL DES NANOTECHNOLOGIES

Quelle réalité du marché des nanotechnologies aujourd'hui ?

À l'heure actuelle, les nanotechnologies sont déjà utilisées dans un certain nombre de produits commercialisés. En 2011, l'initiative américaine *The Project on Emerging Nanotechnologies*⁽⁷⁾ a ainsi inventorié plus de 1 300 produits commerciaux incorporant des nanotechnologies. Certaines études⁽⁸⁾ estiment le marché mondial à 147 milliards de dollars en 2007, avec des prédictions, d'ici 2015, de l'ordre de 3 100 milliards de dollars. Cependant, l'absence d'inventaire des industries produisant ou utilisant des nanotechnologies ainsi que l'absence de nomenclature internationale autorisant des comparaisons pertinentes incitent à une grande prudence face à ces estimations.

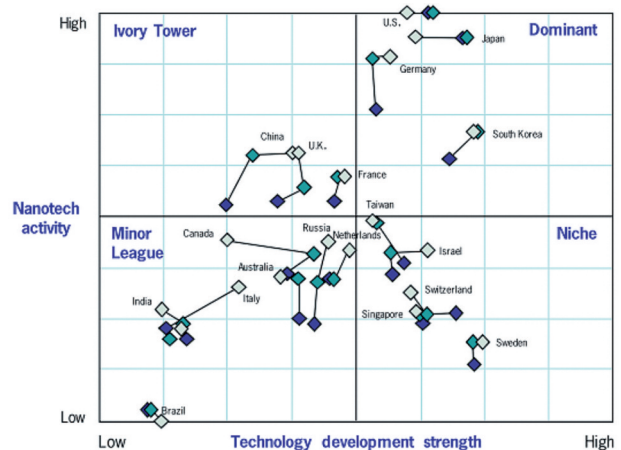
Une intense compétition internationale

Depuis le lancement en 2000 de la *National Nanotechnology Initiative* (NNI – encadré 2) aux États-Unis, presque tous les pays ont lancé un programme national de développement des nanotechnologies. Dans le monde, les gouvernements investissent actuellement 10 milliards d'euros par an dans la R & D du domaine couvert par la désignation "nanotechnologies". Les États-Unis dominent, suivis par le Japon et l'Allemagne. De nouveaux entrants particulièrement dynamiques tels que la Chine, la Corée du Sud ou la Russie affichent d'importants taux de progression du nombre des publications et brevets. Pour la première fois, l'investissement chinois (en parité de pouvoir d'achat) aurait dépassé celui des États-Unis en 2011⁽⁹⁾.

La France peut progresser en matière de transfert technologique et d'applications commerciales...

Le seul volume des investissements n'indique cependant pas les pays les mieux placés pour transférer les résultats de la recherche en bénéfices économiques. Un classement de juillet 2011⁽¹⁰⁾ selon un indicateur d'efficacité de transfert donne les résultats suivants : en tête se trouvent les États-Unis, leader incontesté, puis la Chine, la Russie, l'Allemagne, le Japon, suivis de l'Union européenne, la Corée du Sud, Taiwan, le Royaume-Uni et l'Inde. La France, quant à elle, n'est pas présente dans le *benchmark*, ayant souffert jusqu'ici du syndrome dit de la "tour d'ivoire" : une bonne activité de recherche, mais une faible efficacité du transfert technologique vers les applications industrielles et commerciales.

Figure 1
Classement des pays selon la force de leur activité de recherche en nanotechnologies et leur capacité de transfert vers les applications industrielles et commerciales



Source : Lux research Inc (2009), *Nanomaterials State of the Market Q1 2009*.

... en valorisant ses nombreux programmes de recherche dédiés aux nanotechnologies

Afin de combler ce retard relatif dans le transfert des découvertes aux applications industrielles, la France a mis en place un ensemble de dispositifs de soutien à l'innovation : dans le domaine des micro- et nanotechnologies, il existe cinq pôles de compétitivité visant à favoriser les coopérations entre entreprises, laboratoires de recherche et établissements de formation.



[7] Project on Emerging Nanotechnologies, *Nanotech-enabled Consumer Products Continue to Rise*, 10 mars 2011.

[8] Lux Research Inc (2009), *Nanomaterials State of the Market Q1 2009*.

[9] Cientifica Ltd (2011), *Global Funding of Nanotechnologies and its Impact*, juillet.

[10] *Ibid.*

D'importants programmes de financement dédiés aux nanotechnologies ont été mis en place : Nano-Innov, doté en 2009 de 70 millions d'euros dans le cadre du plan de relance de l'économie, repose notamment sur la création de centres d'intégration des nanotechnologies à Grenoble, Saclay et Toulouse. Dans le domaine de la nanoélectronique, le plan Nano 2012, lancé en avril 2009, vise à développer et produire les prochaines générations de circuits intégrés. Ce programme de R & D de 2,3 milliards d'euros sur 5 ans, dont 477 millions financés par l'État et 180 par les collectivités territoriales, associe le CEA-Léti, STMicroelectronics et d'autres acteurs du pôle de compétitivité Minalogic (situé à Grenoble).

Dans le cadre des investissements d'avenir, le gouvernement a alloué à l'été 2011 – en complément du plan Nano 2012 – 135 millions d'euros pour la nanoélectronique⁽¹¹⁾, 80 millions d'euros à des équipements de recherche en nanotechnologies, ainsi que 15 millions d'euros pour 6 projets en nanobiotechnologies.

La France occupe en outre un *leadership* européen sur le marché des nanocomposants pour systèmes embarqués. En revanche, le potentiel des nanotechnologies en biologie et santé reste à valoriser.

Encadré 2

Dix ans de nanotechnologies aux États-Unis : bilan du programme NNI

Porté par un groupe influent de chercheurs et responsables politiques américains, qui avaient entrevu précocement les possibilités offertes par les nanotechnologies, les États-Unis ont mis en place en 2000 un programme fédéral global de financement des nanotechnologies : la *National Nanotechnology Initiative*. 14 milliards de dollar ont été investis dans ce programme, dont le budget a été multiplié par 5 en 10 ans. La NNI est née de la volonté de coordonner les différentes agences fédérales pour éviter de se heurter à leur fonctionnement relativement cloisonné, afin d'assurer une stratégie explicite et cohérente de développement des nanotechnologies aux États-Unis. Dans cette optique, des financements de projets ciblés (nanosolaire, nanoélectronique et nanofabrication), dans lesquels au moins trois agences doivent collaborer, ont été mis en place en 2011.

Problématique négligée au lancement du programme, l'impact environnemental et sanitaire des nanomatériaux fait l'objet d'importantes études depuis quelques années.

Quel bilan tirer du programme NNI après dix ans de mise en œuvre ?

Indéniablement, le programme est une réussite dans sa difficile mission de coordonner et faire travailler conjointement les différentes agences. L'autre point positif est la formalisation d'un programme d'ensemble, cohérent, avec des priorités définies et une transparence sur les financements de R & D. Le programme est périodiquement évalué par deux instances indépendantes, ce qui a conduit à son amélioration continue au cours des dix dernières années. Les États-Unis se sont assurés avec ce programme une base solide d'infrastructures de recherche, sur lesquelles ils comptent s'appuyer pour passer à une phase intensive de transfert vers l'industrie et de commercialisation dans la décennie à venir.

Le contexte dans lequel le programme NNI est né est particulièrement intéressant et instructif : en effet, la NNI a été développée aux États-Unis par Mihail Roco, coauteur du rapport *Converging Technologies for Improving Human Performance*⁽¹²⁾, connu des spécialistes pour sa vision très particulière des finalités de la convergence NBIC⁽¹³⁾, à savoir l'augmentation des performances humaines. Ce programme a donc été promu auprès des décideurs sur la base d'une approche très singulière, dans laquelle la finalité des développements technologiques est fixée avant d'avoir été débattue.

Ainsi, s'il y a des procédures de participation des citoyens dans le programme NNI, ce n'est pas dans l'optique de discuter des finalités et des orientations de la recherche, mais bien pour travailler sur le simple plan de "l'acceptabilité".

Au final, l'organisation et le pragmatisme du programme sont intéressants, mais la philosophie qui le sous-tend est plus discutable (encadré 3).

DES PRÉOCCUPATIONS DE NATURES DIVERSES

Les risques pour la santé et l'environnement

Du fait de leur taille, les nanoparticules peuvent franchir les barrières qui séparent l'extérieur de l'intérieur de l'organisme, et même entrer dans différents organes, notamment le cerveau. Leurs propriétés spécifiques à l'échelle moléculaire, combinées à un grand rapport surface/volume qui augmente fortement les surfaces de réaction chimique disponibles, leur confèrent de grandes capacités à interagir avec le vivant au niveau cellulaire.



[11] Discours d'Éric Besson, "Pour que la nanoélectronique française soit à l'avant-garde des grandes ruptures technologiques, nous soutenons l'innovation", 21 juillet 2011.

[12] Mihail R. et Bainbridge W. (2002), *Converging Technologies for Improving Human Performance*, National Science Foundation.

[13] Pour une définition de ces termes, voir l'encadré 3.

Les travaux de toxicologie initiés ces dernières années commencent à livrer quelques lois et principes de ces interactions parfois complexes et nouvelles (maladies auto-immunes). Cependant, malgré des progrès dans les domaines de la métrologie et de la caractérisation des nanoparticules, on ignore encore largement quels peuvent être les effets sur la santé ou l'environnement de leur diffusion à grande échelle. Par ailleurs, les données des industriels les utilisant sont, pour le moment, peu accessibles et non systématiquement inventoriées. Le cycle de vie des nanoparticules, depuis leur production jusqu'à leur utilisation et leur fin de vie, reste à ce jour une inconnue et donc un enjeu de santé publique. Une première conclusion émerge des dernières années de recherche intense en nanotoxicologie : une approche de la toxicité "au cas par cas" de tous les nanomatériaux n'est pas envisageable. Selon certaines études⁽¹⁴⁾, près de 50 ans seraient nécessaires uniquement pour tester la toxicité de tous les nanomatériaux actuels ; les tests sur seulement 2 000 substances par an pourraient coûter 10 milliards de dollars, et nécessiteraient le sacrifice d'un nombre considérable d'animaux de laboratoire chaque année afin de réaliser les essais de toxicité *in vivo*⁽¹⁵⁾. Ainsi, au lieu de contrôler au cas par cas la toxicité des nanomatériaux "en bout de chaîne", l'idée se développe de travailler dès la conception des produits pour limiter les risques (approche dite "*safe by design*"⁽¹⁶⁾). Le risque pour la santé ou l'environnement étant fonction à la fois de la toxicité et de l'exposition, il est possible de limiter les risques en agissant dès la conception sur chacun de ces volets (taille minimale d'agglomérats pour éviter le passage des particules de dioxyde de titane dans la peau pour les crèmes solaires, nanoparticule intégrée dans une matrice limitant sa toxicité, etc.).

Les questions éthiques et les incertitudes sur l'impact sociétal des nanotechnologies

Si les questions de toxicité se posent dès maintenant sur l'utilisation des nanotechnologies en tant que matériaux, de nombreuses autres questions relatives aux applications émergentes des nanotechnologies comme systèmes vont devenir plus prégnantes. Maintes questions éthiques liées à l'impact des technologies sur les modes de vie, les libertés et la nature de l'homme – qui se posent depuis l'avènement des TIC notamment – seront assez profondément renouvelées par l'apport des nanotechnologies.

Les applications de la nanoélectronique, notamment *via* les puces RFID⁽¹⁷⁾, donneront par exemple de nouvelles dimensions au débat sur l'hypertraçabilité des individus et l'atteinte potentielle aux libertés individuelles. Des questions éthiques inédites émergeront sans doute des possibilités offertes par la convergence croissante et la complémentarité des nanotechnologies avec d'autres technologies : biotechnologies, technologies de l'information et de la communication (TIC) et sciences cognitives notamment. La biologie synthétique prévoit de créer des mécanismes biologiques apparentés à la vie, et l'on entrevoit des possibilités d'hybrider le corps humain avec des dispositifs artificiels actifs (mécaniques, électroniques, etc.), voire "d'augmenter" les performances physiques et cognitives de l'homme. Selon le philosophe Jean-Pierre Dupuy : "Les nanotechnologies ouvrent un continent immense que l'homme va devoir normer s'il veut leur donner sens et finalité. Il faudra que le sujet humain recoure à un surcroît de volonté et de conscience pour déterminer non pas ce qu'il peut faire, mais bien ce qu'il *doit* faire⁽¹⁸⁾". Plus fondamentalement, l'effacement de frontières actuellement claires entre l'être biologique vivant et le non vivant pourrait bouleverser le regard porté sur l'homme. Ainsi, modifier son activité cérébrale par l'implantation de nanoélectrodes met-il en péril l'intégrité humaine ? Quel regard sera porté sur ceux qui ne pourraient ou ne voudraient pas accéder à des technologies "améliorantes" ? Autant de questions qui nécessitent d'être identifiées, posées et hiérarchisées collectivement et qui doivent mûrir.

Encadré 3

Convergence NBIC et technologies convergentes

L'expression "convergence NBIC" désigne le fait que de nombreuses évolutions technologiques viendront de l'exploitation conjointe et en synergie des avancées des nanotechnologies, biotechnologies, technologies de l'information et sciences cognitives. Les exemples d'applications en cours de développement issues des technologies convergentes se multiplient : création d'une main synthétique dotée d'une sensibilité artificielle grâce à des nanocapteurs et contrôlée par le cerveau, ou encore recherches au MIT Institute for Soldier Nanotechnology sur la tenue de combat du XXI^e siècle, où l'ingénierie biologique, la robotique et les nanotechnologies convergent pour fabriquer un exosquelette.

En 2001, un workshop organisé par la National Science Foundation (NSF) aux États-Unis et intitulé *Converging*



[14] Choi J.Y., Ramachandran G., Kandlikar M. (2009), *The Impact of Toxicity Testing Costs on Nanomaterial Regulation*, Environmental Science & Technology.

[15] Motavalli J. (2010), *Wanted: Nano-Cops*, The New Haven Independent.

[16] Tinkle S. (2010), *Examining the Holy Grail of Nanotechnology : Safe by Design*.

[17] Radio Frequency Identification.

[18] Dupuy J.-P. et Roure F. (2004), *Les nanotechnologies : éthique et prospective industrielle*, Conseil général des mines et Conseil général des technologies de l'information.

Technologies for Improving Human Performance a présenté une vision de la convergence NBIC avec pour finalité à long terme la possibilité de modifier les capacités physiques et intellectuelles des êtres humains. En écho à l'approche américaine, la Commission européenne a publié en 2004 un rapport^[19] proposant la mise en place d'une approche spécifiquement européenne de la question des technologies convergentes (TCSC : technologies convergentes pour la société de la connaissance européenne), se démarquant de l'approche américaine par un encadrement éthique du développement de ces technologies, visant l'intérêt général et non l'amélioration des individus. Si les possibilités décrites par la NSF dans son rapport ont parfois été jugées "futuristes" et peu crédibles, il est indéniable en revanche que de nouvelles applications autrefois techniquement inimaginables sont progressivement rendues possibles par la complémentarité des différentes disciplines, générant comme un véritable "concentré de questions éthiques".

Ainsi, l'apport des nanotechnologies et de la bio-informatique à la biotechnologie a rendu possible l'émergence de la biologie synthétique, discipline qui vise au "design intentionnel de systèmes biologiques artificiels".

➤ VERS UN DÉVELOPPEMENT RESPONSABLE DES NANOTECHNOLOGIES

De nombreuses réflexions en cours à l'échelle internationale

La publication en 2008 par la Commission européenne d'un **code de conduite pour la recherche en nanosciences et nanotechnologies**^[20] atteste d'une volonté de définir les grands principes d'un développement responsable des nanotechnologies. Des efforts de coordination se mettent en place afin d'établir les bases d'une gouvernance internationale des nanotechnologies : travaux de normalisation au sein de l'ISO, ou encore groupe de travail dédié au sein de l'OCDE. En 2004, un processus de "dialogue international pour le développement responsable des nanotechnologies et des technologies convergentes" s'est mis en place à l'initiative du directeur du programme NNI aux États-Unis. Ce dialogue dit "processus Alexandria"^[21], ouvert à tous les pays, vise à anticiper les

conflits potentiels (économiques, éthiques, etc.) entre pays et à définir les bases d'une gouvernance mondiale. La France participe activement à toutes ces initiatives internationales et la continuité de son implication est cruciale étant donné les enjeux d'une régulation internationale.

L'ensemble de ces réflexions semble converger vers l'idée que trois fonctions clefs doivent être assurées pour une bonne gouvernance :

- ▶ fonction d'observation des changements induits par les nanotechnologies ;
- ▶ fonction de concertation avec le public et l'ensemble des parties prenantes ;
- ▶ fonction de décision, fondée sur l'apport de l'observation et de la concertation.

Le projet de recherche européen *FramingNano*^[22] souligne l'importance d'une gouvernance dynamique, où des échanges continus se font entre les fonctions de concertation, d'observation et de décision. La concertation avec l'ensemble des parties prenantes permet d'identifier des critères pertinents d'évaluation des changements induits par les nanotechnologies (bénéfiques, risques, effets systémiques). À l'échelle européenne, un observatoire des nanotechnologies a été développé dans le cadre du projet Observatory-Nano^[23]. Constitué d'experts de disciplines différentes, il rend compte de l'état de l'art et des changements induits par les nanotechnologies, selon ces critères à la fois techniques, d'impact environnemental et sanitaire, et d'impact éthique, sociétal, légal et économique. Ainsi, les décisions publiques sont alimentées par un panel constitué de différentes parties prenantes, permettant de dresser régulièrement un état de l'art. Cet observatoire européen doit être pérennisé.

Le besoin d'une gouvernance forte, transparente et ouverte

En France, les pouvoirs publics ont saisi la Commission nationale du débat public afin d'organiser un débat visant à dégager les pistes d'un développement responsable des nanotechnologies. Ce débat qui a eu lieu d'octobre 2009 à février 2010^[24], bien que perturbé par une opposition radicale de la part de certains groupes, a mis en évidence plusieurs éléments : tout d'abord un très important déficit



[19] Nordmann A. (2004), *Converging Technologies – Shaping the Future of European Societies*, Commission européenne.

[20] Commission européenne (2008), *Recommandation de la Commission concernant un code de bonne conduite pour une recherche responsable en nanosciences et nanotechnologies*. Ce code spécifie notamment que l'amélioration des performances humaines, pour des raisons autres que thérapeutiques, n'a pas lieu d'être, et que le principe de précaution devrait guider les décisions.

[21] En référence à la ville d'Alexandria aux États-Unis où s'est tenue la première séance en 2004, réunissant des représentants de 25 pays et de la Commission européenne.

[22] Projet mené de 2008 à 2010, visant à proposer un modèle de gouvernance internationale des nanotechnologies, sur la base de l'analyse des pratiques existantes et de l'apport des différentes parties prenantes : <http://www.framingnano.eu>

[23] Projet se déroulant de 2008 à 2012, visant à rassembler l'expertise européenne sur l'analyse technologique, économique, mais également sanitaire, environnementale, éthique et sociétale des nanotechnologies : <http://www.observatory-nano.eu>

[24] Pour une présentation succincte du contexte et du déroulement du débat, voir Philippe Deslandes, président de la CNDP (2010), *Bilan du débat public sur le développement et la régulation des nanotechnologies*.

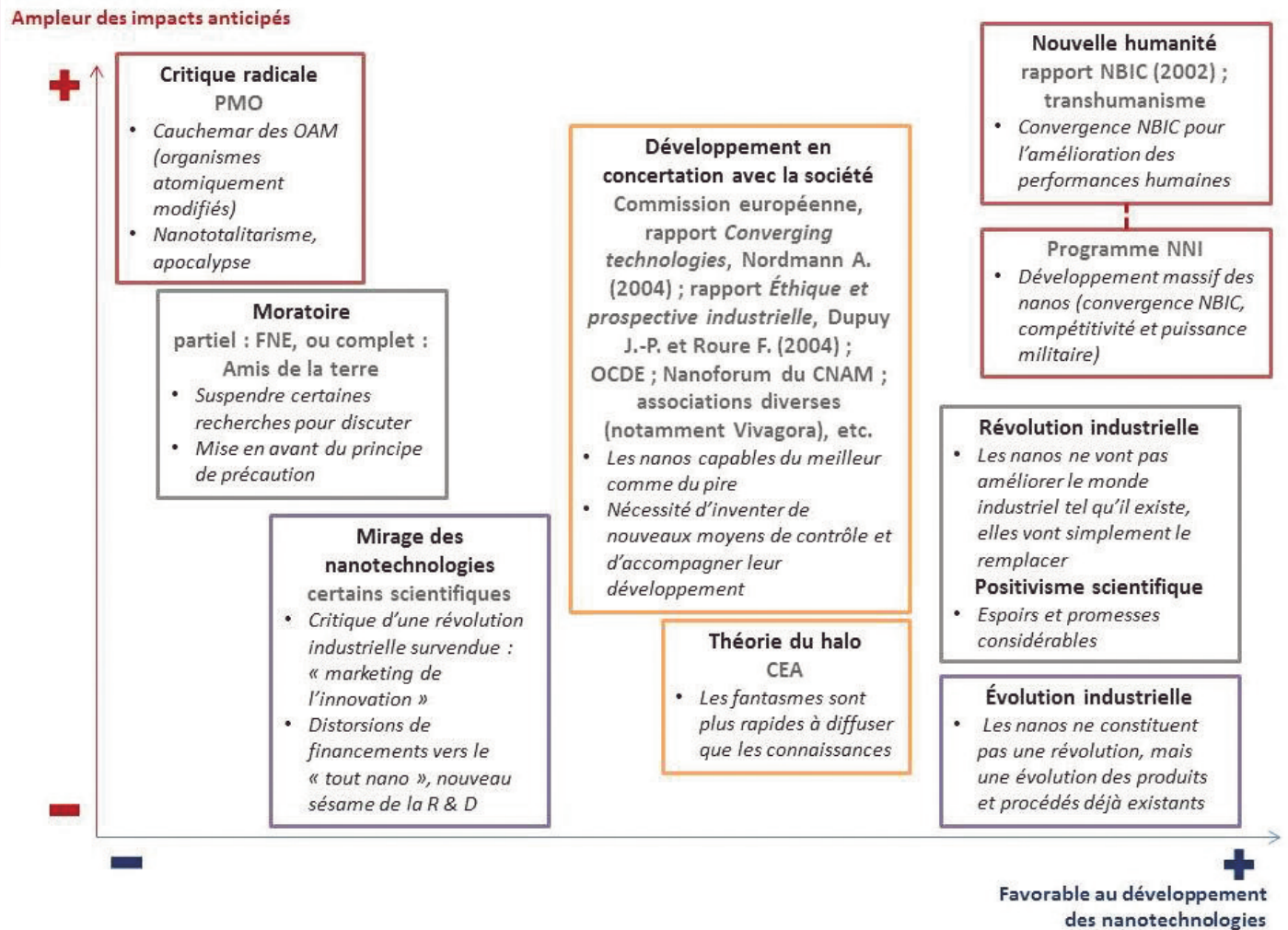
d'information du grand public, non seulement sur les aspects scientifiques des nanotechnologies, mais aussi sur les enjeux sociétaux associés. De plus, la grande majorité des parties prenantes représentées a exprimé le besoin d'une gouvernance plus transparente et plus ouverte.

La gouvernance est la façon dont on décide de partager les pouvoirs : qui prend quelles décisions ? Sur quelles bases ?

La figure 2 permet de visualiser certaines des positions couramment rencontrées. On peut noter que, pour le moment, l'acteur manquant dans ce paysage est le grand public.

Figure 2

Une multitude de positions et de discours sur les nanotechnologies



Ce graphique propose une présentation simplifiée qui ne reflète pas nécessairement la complexité des positions des différents acteurs.

Source : CAS

Le débat public a été une première étape, qui nécessite une réponse pour concrétiser son utilité et appelle à la poursuite d'une politique de développement des nanotechnologies intégrant la concertation avec les différents éléments de la société civile dans son mode de fonctionnement. Les multiples enjeux liés aux nanotechnologies – compétitivité, gestion des risques, questions éthiques et acceptabilité sociale – réclament une forme de gouvernance innovante, dans laquelle gouvernements et composantes de la société interagissent de manière dynamique pour déterminer collectivement la trajectoire de développement souhaitée. Cette approche présuppose l'abandon d'un certain nombre d'idées reçues, comme celle selon laquelle il suffirait d'informer et de former scientifiquement le public pour qu'il soutienne les développements technologiques. En réalité, des études⁽²⁵⁾ tendent à montrer que la position des "profanes" ne tient pas tant à la compréhension et à l'information sur les caractéristiques spécifiques des nanotechnologies qu'à l'opinion préalable qu'ils ont sur les technologies et sur les institutions qui les gèrent. On voit alors toute l'importance de la transparence dans les procédures de concertation pour obtenir une confiance éclairée des citoyens : transparence sur les modes de prise de décision (c'est-à-dire sur la gouvernance), les financements de R & D, l'éthique, les finalités de développement, la gestion des risques, etc. L'engagement très en amont des citoyens, selon des modalités qui restent largement à développer, permet un développement des nanotechnologies en adéquation avec les attentes sociétales. Si, à court terme, la régulation peut être considérée comme une barrière au développement des marchés, à plus long terme, elle constituera sans doute le premier facteur de compétitivité des entreprises françaises en nanotechnologies, en créant un environnement d'investissement et de consommation plus stable et sûr.

PROPOSITIONS

PROPOSITION 1

À l'exemple d'un certain nombre de pays (Allemagne, États-Unis, etc.), bâtir un plan d'action stratégique pour structurer et expliciter une politique de développement responsable des nanotechnologies en France.

De nombreuses actions sont menées en France pour développer et réguler les nanotechnologies, mais aucun

cadre aussi clair et explicite que peut l'être par exemple la NNI aux États-Unis n'a été créé. La préparation d'un plan stratégique global présente plusieurs intérêts :

- ▶ il concentre et coordonne les efforts, permettant une approche interministérielle indispensable étant donnée la transversalité des questions liées aux nanotechnologies ;
- ▶ il constitue un outil de transparence vis-à-vis de l'ensemble des parties prenantes, en précisant les priorités que se donne le gouvernement, les programmes mis en place, la répartition des rôles et des responsabilités entre les différentes institutions, etc. ;
- ▶ il permet de clarifier la position de la France et de soutenir son implication active dans les initiatives européennes et internationales.

Le plan d'action allemand retient par exemple les objectifs suivants : coordination interministérielle et soutien à la standardisation, accélération du transfert technologique aux secteurs industriels, poursuite d'un dialogue intensif avec le public sur les opportunités et les risques associés aux nanotechnologies. Les Pays-Bas sont particulièrement actifs dans le dialogue science/société et leur plan d'action comprend donc la création d'un comité où l'ensemble des composantes de la société sont présentes pour conseiller le gouvernement sur les aspects éthiques et sociétaux.

Afin de concevoir et de mettre en œuvre efficacement ce plan d'action en France, il serait nécessaire de s'appuyer sur une coordination interministérielle continue. Un site internet, sur le modèle du site très complet de la NNI⁽²⁶⁾ par exemple, permettrait de relayer les différentes composantes du plan stratégique.

PROPOSITION 2

Soutenir le développement d'un observatoire européen, voire mondial, du développement des nanotechnologies et de leurs différents impacts.

La mise en place d'un observatoire permanent des nanotechnologies, qui dresserait en continu l'état de l'art, sur des critères techniques, environnementaux et sanitaires, éthiques et sociétaux serait un élément essentiel à la gouvernance des nanotechnologies. Soutenir la pérennisation de l'Observatoire européen *ObservatoryNano* est une première étape. Par ailleurs, en France l'OMNT



[25] Commission européenne (2010), *Understanding Public Debate on Nanotechnologies – Options for Framing Public Policy*.

[26] Le site du NNI comporte des informations générales sur les nanotechnologies, leurs applications majeures, les objectifs et le contenu du programme, une base de données complète des projets de recherche, les partenariats industriels, ainsi que de nombreux supports pédagogiques et les actualités sur le sujet ; voir www.nano.gov

(Observatoire des micro- et nanotechnologies), géré conjointement par le CNRS et le CEA, assure déjà une fonction d'observation sur les critères scientifiques et techniques, mais les autres aspects restent à développer. Enfin, à terme, le dialogue international pour le développement responsable des nanosciences (processus Alexandria) pourrait conduire à la création d'un tel observatoire à l'échelle mondiale, dans l'idée d'une sorte de "GIEC des nanos".

PROPOSITION 3

Associer le public et l'ensemble des parties prenantes en amont et tout au long du développement des nanotechnologies.

Si de nombreux rapports soulignent la nécessité d'associer la société civile à la définition et au traitement des enjeux des nanotechnologies, force est de constater que les formes que cette participation devrait prendre sont loin d'être fixées. Le champ de la participation citoyenne est largement expérimental, et il est nécessaire de reconnaître à la fois l'importance de cette implication et sa complexité. Des analyses⁽²⁷⁾ des cinq dernières années de débats en Europe sur les nanotechnologies permettent tout de même de dégager quelques clefs. Deux démarches complémentaires de concertation semblent envisageables. D'un côté, il paraît essentiel de créer des espaces pérennes de dialogue, ouverts à toutes les parties prenantes, et dont l'objectif n'est pas le consensus sur une question donnée mais l'expression libre de points de vue divergents. Ce cadre permet d'identifier les questions scientifiques, éthiques et sociales que posent ces nouvelles technologies. Un exemple d'initiative de ce type est le NanoForum du CNAM. Il favorise notamment la création de partenariats territoriaux, et contribue à la structuration de la société civile, indispensable au débat. Cette première forme de concertation ne vise pas à éclairer une décision politique particulière et n'a pas vocation à produire des recommandations. Étant donné que le développement des nanotechnologies en est à un stade encore précoce, cette phase de concertation et d'anticipation des enjeux, notamment éthiques et sociétaux, est tout à fait envisageable.

En parallèle, une seconde forme de concertation peut être mise en place, située plus en aval, consistant à débattre d'une question précise, afin d'alimenter une décision

politique donnée. Dans ce type de concertation, il est essentiel de bien définir la question posée, de présenter les différentes alternatives de la décision politique, et enfin, une fois la concertation terminée, de faire un retour aux participants pour indiquer de manière transparente comment les résultats de la concertation ont été pris en compte. Sans ce retour, on observe une dégradation progressive de la confiance des citoyens dans les institutions qui gèrent les technologies concernées, conduisant à un effet délétère sur la construction d'une opinion éclairée des citoyens sur les nouvelles technologies⁽²⁸⁾.

PROPOSITION 4

Préparer aujourd'hui la compétitivité de demain en développant une "filière intégrée" des nanotechnologies.

L'idée de "filière intégrée" des nanotechnologies, défendue notamment en Allemagne, considère le développement des nanotechnologies comme un continuum depuis la recherche, le transfert et l'innovation, la mise sur le marché jusqu'à la fin de vie des produits.

La France, bien que dotée d'une recherche fondamentale de qualité (comme en témoigne le nombre de publications scientifiques) et d'infrastructures solides dans le domaine des nanotechnologies, apparaît en revanche moins bien placée du point de vue de l'efficacité du transfert des découvertes vers l'industrie et les applications commerciales. Dans une "filière intégrée", dès qu'un matériau intéressant est découvert, on vérifie son potentiel d'industrialisation, afin d'éviter les pertes considérables qui se produisent lors de l'échec du passage en démonstrateur industriel. S'il existe des centrales de proximité mettant à disposition des salles blanches⁽²⁹⁾ pour les acteurs (chercheurs et industriels) de la nanoélectronique, l'équivalent n'existe pas encore pour les nanomatériaux par exemple. Ce type de plateforme permettrait de tester plus rapidement le potentiel d'industrialisation, mais également d'intégrer dès la conception des matériaux les problèmes de sécurité et de sûreté. Sur le mode des pôles de compétitivité et des instituts de recherche technologique, toutes les initiatives favorisant l'interaction entre recherche et industrie doivent être favorisées, notamment dans des domaines encore peu développés mais pourtant très prometteurs, tels que la nanobiologie et la nanomédecine.



[27] Rathenau Institute [2008], *Ten Lessons for a Nanodialogue – The Dutch Debate about Nanotechnology thus Far*.

[28] Plancher B. [2011], *La concertation au service de la démocratie environnementale*.

[29] Salle d'expérimentation et de fabrication où la concentration de l'air en particule est maîtrisée afin de ne pas interférer avec la fabrication de semi-conducteurs notamment.

Tout en veillant à rester à la pointe en nanoélectronique, une diversification des investissements vers ces derniers secteurs amenés à croître considérablement d'ici 2015⁽³⁰⁾ pourrait permettre de se positionner à l'avenir sur des marchés porteurs.

PROPOSITION 5

Prévenir les risques sanitaires et environnementaux selon trois axes : stabilisation des matériaux dès leur conception, mesure et traçabilité des nanoparticules, maîtrise de l'exposition.

Le risque pour la santé et l'environnement est le résultat combiné de deux facteurs, l'exposition et la toxicité. Les récentes évolutions dans le champ d'étude de la toxicité des nanoparticules et nanomatériaux appellent à un changement sensible de stratégie : en effet, s'il faut bien sûr continuer les études de toxicité, l'approche au cas par cas n'est plus envisageable, chaque matériau étant susceptible de présenter une toxicité qui lui est propre. Il est donc nécessaire de soutenir le développement de démarches telles que l'approche "safe by design", qui vise à minimiser la toxicité et les risques d'exposition aux nanoparticules dès la conception du produit. Cela nécessitera de faire travailler ensemble toxicologues, physico-chimistes, spécialistes des matériaux, etc.

En parallèle, il faut agir dès à présent sur le volet "exposition". Des mesures de précaution doivent notamment être mises en place pour protéger les travailleurs sur les lieux de production des nanomatériaux. Une traçabilité réelle et un inventaire systématique des nanomatériaux et des industries les utilisant, en cours de développement, constitue un prérequis indispensable, dont il faudra s'assurer de l'applicabilité et de l'effectivité pour éviter un résultat contreproductif.

Enfin, la France aura un rôle important à jouer dans l'adaptation de la réglementation européenne Reach, afin d'inclure spécifiquement les nanomatériaux, voire de développer un "nano Reach" propre aux nanoparticules.

CONCLUSION Les nanotechnologies constituent un enjeu majeur de croissance future, et la France dispose de compétences de haut niveau en recherche fondamentale dont elle peut tirer parti pour se positionner dans ces domaines émergents. Nous sommes cependant encore loin de la compréhension réelle de l'applicabilité des nanotechnologies, des risques et des bénéfices qu'elles présentent. Face à ces incertitudes, il apparaît de plus en plus que ces technologies n'exprimeront leur plein potentiel – en termes de bénéfice sociétal mais également de compétitivité – qu'à condition d'en accompagner le développement. Une opportunité se profile de mener une réflexion de fond sur ce que devrait être une bonne gouvernance des nanotechnologies, où l'observation et la concertation tiendraient une grande place. La régulation des nanotechnologies pourrait ainsi servir de creuset à une réflexion plus large sur le développement responsable des nouvelles technologies en général.



Aude Teillant, département Développement durable



[30] La nanomédecine, qui représentait 2 % du marché des nanos en 2007, pourrait passer à 17 % d'ici 2015. Source : Lux Research.

**DERNIÈRES
PUBLICATIONS
À CONSULTER**

sur www.strategie.gouv.fr, rubrique publications

Notes d'analyse :

N° 247 ■ De nouvelles organisations du travail conciliant égalité femme/homme et performance des entreprises (novembre 2011)

N° 245 ■ L'adaptation du parc de logements au vieillissement et à la dépendance (octobre 2011)

Notes de synthèse :

N° 246 ■ Les aides publiques dommageables à la biodiversité (octobre 2011)

N° 244 ■ Une ambition spatiale pour l'Europe.
Vision française à l'horizon 2030 (octobre 2011)

N° 243 ■ Demain, la grande vitesse ferroviaire dans le monde (octobre 2011)

N° 242 ■ Pour une ouverture progressive du transport ferroviaire de voyageurs à la concurrence (octobre 2011)

Retrouvez les dernières actualités du Centre d'analyse stratégique sur :

-  Internet : www.strategie.gouv.fr
-  Facebook : [centredanalysestrategique](https://www.facebook.com/centredanalysestrategique)
-  Twitter : [Strategie_Gouv](https://twitter.com/Strategie_Gouv)



La Note d'analyse n° 248 - novembre 2011 est une publication du Centre d'analyse stratégique

Directeur de la publication : Vincent Chriqui, directeur général

Directeur de la rédaction : Pierre-François Mourier, directeur général adjoint

Secrétaire de rédaction : Delphine Gorges

Impression : Centre d'analyse stratégique

Dépôt légal : novembre 2011

N° ISSN : 1760-5733

Contact presse :

Jean-Michel Roullé, responsable

de la communication

01 42 75 61 37 / 06 46 55 38 38

jean-michel.roulle@strategie.gouv.fr



Le Centre d'analyse stratégique est une institution d'expertise et d'aide à la décision placée auprès du Premier ministre. Il a pour mission d'éclairer le gouvernement dans la définition et la mise en œuvre de ses orientations stratégiques en matière économique, sociale, environnementale et technologique. Il préfigure, à la demande du Premier ministre, les principales réformes gouvernementales. Il mène par ailleurs, de sa propre initiative, des études et analyses dans le cadre d'un programme de travail annuel. Il s'appuie sur un comité d'orientation qui comprend onze membres, dont deux députés et deux sénateurs et un membre du Conseil économique, social et environnemental. Il travaille en réseau avec les principaux conseils d'expertise et de concertation placés auprès du Premier ministre : le Conseil d'analyse économique, le Conseil d'analyse de la société, le Conseil d'orientation pour l'emploi, le Conseil d'orientation des retraites, le Haut Conseil à l'intégration.

www.strategie.gouv.fr