ATELIER DE REFLEXION PROSPECTIVE (ARP) EN NANOTECHNOLOGIES ARP-4N

Rapport

Version du 27 Janvier 2016

Plan du rapport

1- ARP 4N : Organisation et contributions 3

2- Préconisations issues du projet 4

3- Résultats des travaux conduits dans les différents axes du projet 11

3-1- Prospective scientifique et technologique dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies, préparée en appui sur l'OMNT 11

3-2- Description de 4 scenarii prospectifs d'évolution et d'impacts sur les marchés des nanosciences et nanotechnologies en France 55

3-3- Rapport du séminaire nanoéthique 81

4- Liste des experts invités au séminaire de prospective organisé par l'axe « Impact technologique, valorisation industrielle et marché » 82

5- Membres du comité opérationnel du projet 84

6- Remerciements 85

7- Annexe 86

7-1- Exemple de fiche d'analyse de l'impact des nanosciences et nanotechnologies 87

7-2- Résultat de l'enquête auprès des experts 89

7-3- Programme du séminaire d'experts 92

7-4- Composantes et variables 94

7-5- Synthèse des hypothèses et scenarii 175

1-ARP 4N : Organisation et contributions

Les nanosciences et nanotechnologies constituent un domaine en rapide évolution, toujours en expansion après son apparition peu avant les années 2000. Elles contribuent à l'ensemble des défis de l'ANR et impactent, de manière plus ou moins décisive, un grand nombre de filières industrielles. Dans plusieurs pays, des initiatives nationales ont été mises en place pour accompagner, orienter et structurer le développement du domaine, lequel s'est souvent accompagné d'un débat sociétal actif.

Dans ce contexte, l'ARP a été structuré afin d'apporter une vision multifactorielle de la dynamique des nanosciences et nanotechnologies, et d'en appuyer la construction sur une expertise large et diversifiée, à même de contribuer à la construction de conclusions aussi pertinentes que possible.

Les facteurs pris en compte sont :

- La prospective sur les axes de développements scientifiques et les opportunités de ruptures associés aux recherches en nanosciences et nanotechnologies. Ce travail éclaire sur les dynamiques et perspectives scientifiques et technologiques.
- L'analyse des domaines d'impact technologique et de marché, et du transfert vers l'industrie des avancées en nanosciences et nanotechnologies. Cette analyse s'est appuyée sur la méthode des scenarios afin de fournir une vision cohérente des développements probables à venir et d'éclairer les conséquences de futures orientations et décisions.
- La comparaison des politiques mises en œuvre dans d'autres pays (comparaison internationale)
- L'analyse des aspects sociétaux et éthiques.

L'expertise mobilisée est celle

- des *12 membres du comité opérationnel de l'ARP*, lequel rassemble des experts principalement issus de la recherche publique et également de l'industrie, et associe la direction de l'OMNT, et des *18 membres du comité d'orientation stratégique de l'ARP, majoritairement issus de l'industrie*, et également de la recherche publique, et de syndicats ou de la société civile.
- de plus de *30 experts issus largement de l'industrie, également de la recherche publique, de structures de valorisation*…, mobilisé par le réseau C'Nano qui ont participé aux séminaires de construction des scénarios, conduits en appui sur le cabinet de prospective Futuribles, et des nombreux acteurs interrogés au travers d'un questionnaire.
- de plus de *100 experts scientifiques, majoritairement issus de la recherche publique,* qui ont volontairement contribué aux 15 groupes de travail thématiques mis en place par l'OMNT pour réaliser une prospective scientifique à « 5 ans » et « 15-20 ans ».
- de *5 experts internationaux*, spécialiste notamment en la « nano-éthique », rassemblés pour un séminaire spécifique à Paris.

2- Préconisations issues du projet

Les préconisations qui suivent s'appuient sur le travail conduit par les experts mobilisés dans le cadre des travaux de l'ARP, selon la démarche explicitée ci-dessus.
Pour partie, ces conclusions rejoignent et reprennent des recommandations issues du rapport préparé par les inspections générales de plusieurs ministères « *Déploiement industriel des nanotechnologies et de la biologie de synthèse sur les territoires précurseur des manufactures du futur »,* rapport publié en décembre 2013. Elles s'appuient également sur les exemples pertinents d'autres pays, qui se sont attachés, sans doute plus que la France, à mettre en place les initiatives et outils permettant à leur économie, leur industrie et leur communauté scientifique, de tirer parti des opportunités considérables offertes par les nanosciences et nanotechnologies. En termes de soutien à l'innovation, le modèle américain de l'ARPA-E pour le soutien aux projets d'innovation de rupture a également inspiré une part des recommandations.

L'analyse de la dynamique scientifique des nanosciences et nanotechnologies, appuyée sur la contribution de plus de 100 experts, a permis l'identification des axes de recherche les plus structurants et prometteurs, à 5 ans, et à 15-20 ans. Cette analyse constitue un élément important, particulièrement à l'attention des agences de financement de la recherche. Elle est présentée en premier après ce chapitre préconisations (chapitre 3.A.).
L'analyse des scenarii de développements des nanosciences et nanotechnologies est le second élément sous-tendant fortement les recommandations effectuées. Ces scenarii sont présentés au chapitre 3.B.

Les scenarii issus des travaux de l'ARP :
Le scenario « tendanciel » émergeant des travaux des experts mobilisés est celui d'une « sortie du jeu lente de la France et de l'Europe » dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies, et des filières industrielles associées. En fonction des évènements à venir, dont les politiques publiques dans le domaine, d'autres scenarii émergent comme crédibles, dont un scenario « atone » caractérisé par des positions fortes préservées dans quelques filières spécifiques, un scenario déclin brutal de la France et de l'Europe, et un scenario conduisant à une position forte de la France et de l'Europe. Les présentations courtes de ces scenarii se trouvent en annexe de ce rapport court.

L'idée phare consiste à mettre en place, à chaque niveau pertinent, une organisation permettant aux acteurs et à la France d'obtenir le meilleur bénéfice de son investissement dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies. Les recommandations associées sont déclinées ci-après en 2 niveaux :

- Recommandations pour les agences de financement et les opérateurs de la recherche publique.
- Recommandations relevant de décisions d'organisation au niveau de l'Etat, ou associant des acteurs situés hors de la « sphère recherche », tels que l'éducation nationale.

Le lien avec l'industrie et l'innovation est au cœur de ces recommandations, et est traité à chaque niveau, avec l'ambition de créer le cadre le plus favorable pour une réelle continuité sur l'échelle des TRL[1] dans l'accompagnement des projets innovants intégrant des nanotechnologies.

[1] « Technological Readiness Level », échelle d'évaluation du degré de maturité atteint par une technologie, adoptée aujourd'hui par exemple dans le cadre des appels à projet de recherche Européens (H2020).

Recommandations portant sur l'organisation de la programmation de l'Agence Nationale de la Recherche, et l'organisation dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies

i) Recommandations relevant principalement de l'ANR ou d'actions pouvant lui être confiées :
Les nanosciences et nanotechnologies contribuent, de manière différenciée mais toujours significative, aux objectifs de l'ensemble des défis de la programmation de l'Agence. De plus, comme mis en évidence par les experts mobilisés dans le cadre de l'axe «développements scientifiques et opportunités de rupture » du projet, des **enjeux scientifiques et technologiques transversaux** émergent, cruciaux pour la dynamique des nanosciences et nanotechnologies, et sous-tendant la capacité de la communauté à aborder chaque domaine. Cependant, ces enjeux transversaux sont, par nature, imparfaitement positionnés au regard des ambitions d'un défi donné, tel que chacun des 10 défis de l'appel à projets générique de l'ANR. Les recommandations sont :

- De donner à l'ANR les moyens de suivre et d'optimiser la contribution des nanosciences et nanotechnologies à ses objectifs, et pour cela :
  - **d'identifier clairement, dans l'appel générique de l'ANR, les contributions attendues dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies,** ce qui est réalisé aujourd'hui principalement pour deux défis : TIC (défi 7) et renouveau industriel (défi 3).
    Cette identification pourra s'appuyer dans un premier temps sur les axes scientifiques proposés dans ce rapport, lesquels sont mis en regard de leur impact sur les défis de l'ANR. Elle devra ensuite être maintenue vivante, en particulier à travers l'information complémentaire apportée par une analyse des projets déposés et sélectionnés à l'ANR.
  - Sur le plan opérationnel, il semble requis de s'appuyer sur **une coordination transversale à l'ensemble des défis au sein de l'ANR**, permettant d'identifier et surtout de positionner clairement pour les déposants, et dans chaque défi, les thématiques à impact large[2]. Dans le cas où la coordination interministérielle sur les nanosciences et nanotechnologies recommandée plus loin serait mise en place, il conviendra naturellement d'assurer un lien entre la « coordination transversale » de l'ANR et le pilotage interministériel.

- De permettre le **soutien aux projets portant sur des thématiques scientifiques et technologiques ou sur des outils ou approches génériques,** pouvant impacter plusieurs défis de l'ANR et plusieurs filières industrielles : le savoir-faire acquis sur ces projets, sur des approches génériques, sous-tend en effet largement la capacité des acteurs à cibler des objectifs ambitieux à long terme dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies. Ils portent entre autres, souvent à des TRLs faibles, sur :
  - Les approches *bottom up* et *top down*, techniques bio-inspirées et chimie combinatoire, matériaux multi-échelle/multifonctionnels et technologies hybrides
  - La maîtrise des interfaces à l'échelle nanométrique
  - Le design, la fabrication et l'intégration de nano-objets et dispositifs multi-échelle / multifonctionnels (ex. capteurs)

[2] Ce travail d'identification des défis pertinents où déposer les projets relevant de thématiques proches de plus d'un défi a été réalisé pour plusieurs thèmes par l'ANR dans son appel générique 2015 (sous la terminologie « interfaces »). Il s'agit donc ici de généraliser cette pratique à un ensemble plus vaste.

- Les procédés conduisant à des matériaux reproductibles, compatibles avec une production de masse et *safer by design / by process.*
- Le contrôle qualité, les protocoles et standards métrologiques
- Le développement de techniques de caractérisations et d'instrumentations couplant la caractérisation fonctionnelle, physique et chimique en laboratoire, *in situ* et *in operando.*
- Les approches d'analyse (éco-) toxicologiques prédictives.
- Le couplage de méthodes de modélisation pour aboutir à une simulation multi-échelle et multi-physique de systèmes complexes, y compris le vivant.

Une « *clusterisation* » de tels projets permettrait d'en accroître considérablement l'impact. Par clusterisation, il faut ici entendre les actions permettant *a minima* d'assurer, pour chacun des domaines identifiés, un dialogue entre les acteurs des différents projets et certainement une coordination. Ces objectifs pourraient prendre la forme de « programmes phares » ou « *flagships* »[3] scientifiques, identifiés au sein de la programmation de l'ANR, et permettraient

- l'identification et le regroupement de l'ensemble des projets financés pertinents pour l'un de ces programmes phares.
- le rassemblement des acteurs impliqués dans les projets, par exemple en périphérie de réunions d'évaluation/présentation des projets organisées par l'ANR.

Les actions précitées permettraient à l'ANR d'accroître considérablement tant l'impact que la visibilité de ses actions dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies. Elles constitueraient naturellement un atout clef pour peser sur la scène **internationale, dans les partenariats noués avec d'autres agences, et dans le lien avec le programme cadre de recherche et de développement de la Commission Européenne**. Aussi, la coordination transversale proposée au sein de l'agence, devrait se voir donner un rôle d'interface avec ces acteurs internationaux, par exemple à travers la participation active du département international de l'ANR.

➢ **De contribuer au renforcement de la dynamique dans le domaine de la recherche et l'innovation responsables**

Le moment actuel dans la discussion des relations entre science et société se caractérise par l'attention portée à la notion de responsabilité. À l'échelle européenne, le cadre RRI (innovation et recherche responsables) occupe une place de choix dans le programme cadre Européen Horizon 2020. A l'étranger, les agences de financement de la recherche focalisent leurs efforts sur la figure du scientifique, avec pour objectif qu'il appréhende d'une manière informée et critique, les concepts et les formes de sa responsabilité et qu'il soit mieux formé à suivre leurs évolutions.
Un exemple d'action pertinente, qui pourrait être portée par l'ANR ou confiée à d'autres acteurs, est inspiré par l'étude des initiatives allemandes, néerlandaises et américaines. Il serait souhaitable de mettre en place des actions spécifiques (modules de formation, workshops délibératifs, exercices d'anticipation) pour les doctorants à travers les Ecoles doctorales et pour les post-doctorants au sein des projets subventionnés. Une incitation forte pour la mise en place de ces actions est cruciale car elle permettra à terme de sensibiliser aux aspects RRI ainsi que d'impliquer les chercheurs confirmés (chefs de laboratoires ou de projets) dans les discussions.

Enfin, les points suivants nous paraissent devoir faire l'objet d'une attention toute particulière :

➢ **La détection et le financement de projets à très hauts risques et très forts impacts**

[3] Sans que ce terme ne doive prêter à confusion avec les initiatives Européennes, les deux *Flagships* du programme Future and Emerging Technologies, *Graphene* et *Human Brain Project*.

Sans que cela ne soit spécifique, les nanosciences et nanotechnologies sont un des domaines où le temps de passage entre la découverte fondamentale et le marché est souvent court. Un soutien attentif aux projets de recherche à haut risque, et à fort impact, est donc clef pour obtenir le meilleur résultat dans le domaine. Nous recommandons la mise en place d'un financement et d'un mode de gestion dédiés à ce type de projets. Le schéma proposé ci-après s'inspire de celui mis en œuvre avec succès aux Etats-Unis dans le cadre des appels à projet ARPA-E[4]

- Sélection des projets en plusieurs étapes, de plus en plus sélectives, dans le cadre d'une procédure de maturation des projets, en appui sur un comité de sélection aux compétences élargies couvrant toutes les compétences nécessaires à la R&I et production industrielle.
- Financement avec des points d'étapes réguliers, constituant de réels « Go / No Go ».

L'outil doit permettre de porter la recherche jusqu'au transfert industriel sans interruption dans le financement, afin de ne pas perdre d'opportunités de valorisation. En cohérence, un co-financement par des partenaires industriels, croissant après chaque Go / No Go, pourrait être exigé. Bien établi, un tel outil constitue un label de qualité et de confiance pour les partenaires industriels et les investisseurs[5].

➢ **Les outils transversaux, les plateformes technologiques**

La compétitivité des acteurs des nanosciences et nanotechnologies repose sur l'accès à des plateformes (salles blanches…) offrant des moyens de nano-fabrication et nano-caractérisation au meilleur niveau international. Rassemblant les acteurs, pour une mutualisation au regard des coûts associés et des prévisions d'investissements, ces plateformes sont une ressource indispensable à la conduite d'une large part des projets de recherche en nanosciences et nanotechnologies présentés à l'ANR. Elles sont les lieux de constitution et de partage de savoir-faire génériques et les points de rencontre entre recherche publique et acteurs privés, auxquels elles doivent être ouvertes.

Sur la base d'un effort important conduit dans le cadre du réseau des grandes centrales technologiques RTB[6] conjointement piloté par le CEA et le CNRS, la France dispose de moyens, évolutifs selon les besoins, avec une organisation cohérente s'appuyant sur une plateforme technologique de rang mondial (CEA/LETI) et de cinq plateformes académiques fédérées par le CNRS au sein du réseau RENATECH. Un élargissement de cette coordination aux centrales dites « de proximité » est en cours.

L'organisation existe donc et constitue un atout pour coordonner les développements technologiques et les investissements associés. Il est absolument essentiel que le soutien à ces centrales soit poursuivi et amplifié à un niveau permettant d'assurer la pérennité et le développement d'outils compétitifs.

➢ **La veille et la prospective scientifique et technologique**

L'analyse des modèles français et étrangers montre que le développement des nanosciences et nanotechnologies d'une part requiert l'accès à des infrastructures de recherche (cf. point précédent) dont l'ampleur exige financements et organisation spécifiques, et d'autre part est organisé par les acteurs majeurs en appui ou dans le cadre d'initiatives nationales, comme la NNI aux Etats-Unis.

Ce contexte, auquel s'ajoute le caractère diffusant et la rapide avancée des nanotechnologies, donnent une grande valeur à un effort de veille, de prospective et de comparaison internationale, spécifique. En France,

[4] Lancée de manière effective en 2009 avec un premier financement de 400 millions de dollars, le programme ARPA-E a pour ambition de contribuer au maintien du leadership américain dans les domaines prioritaires des sciences et technologies, et finance des projets à fort impact dans le domaine de l'énergie.

[5] L'intervention de la BPI (Banque Publique d'Investissement) pourrait assurer la continuité entre les financements ANR et FUI.

[6] Le programme intitulé « Un réseau national de grandes centrales de technologie pour la Recherche Technologique de Base (RTB) » a été initié en 2003, et se poursuit encore aujourd'hui, cependant depuis quelques années avec des financements sous le seuil critique permettant un soutien cohérent sur la durée.

plusieurs initiatives vont dans ce sens : c'est le cas de l'OMNT[7], du réseau C'Nano[8], ou encore du programme transversal nanosciences du CEA[9].
Afin de soutenir la décision publique comme privée, la France gagnerait beaucoup à pérenniser et développer plus avant un effort coordonné de veille scientifique et technologique, certainement associé à une cartographie des acteurs publics et privés, pour les nanosciences et nanotechnologies. Ouvert à l'ensemble des acteurs, il constituerait de plus un élément d'attractivité du territoire national.

- **L'animation de la communauté scientifique et industrielle**

Le caractère interdisciplinaire des nanosciences et nanotechnologies rend obligatoire la mise en synergie des communautés scientifiques issues de disciplines, organismes et institutions diverses. Du fait de l'impact économique et sociétal, cette animation doit également associer communautés économiques et industrielles. En France, plusieurs initiatives relèvent de cette démarche : le réseau C'Nano, le Club nanoMétrologie[10], différents GDR dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies. Ces actions jouent le rôle de facilitateur et d'accélérateur pour la créativité des communautés scientifiques et industrielles.

- **Le renforcement du couplage amont-aval**

A l'instar d'initiatives menées dans d'autres pays, des démarches proactives permettant un couplage efficace amont-aval constitueraient des catalyseurs du déploiement des nanosciences et nanotechnologies au niveau national : collaborations amont-aval, mobilité des chercheurs, thèses et post-docs en cotutelle, « *open innovation* », etc.

ii) Autres recommandations pour une action publique coordonnée dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies

L'analyse conduite dans le cadre de l'ARP, et l'inspiration des exemples étrangers, conduisent à des recommandations plus larges que celles spécifiquement adressées à l'Agence. En effet, la transversalité de l'impact des nanosciences et nanotechnologies, par exemple au regard des filières industrielles stratégiques, sous-tend la pertinence d'une coordination nationale dans le domaine, au-delà des actions pertinentes relevant de la seule agence de la recherche. Cette idée rejoint les recommandations du rapport préparé par les Inspections Générales de plusieurs Ministères « *Déploiement industriel des nanotechnologies et de la biologie de synthèse sur les territoires précurseurs des manufactures du futur* », rapport publié en décembre 2013.

[7] Observatoire National des Micro- et Nano-Technologies, créé en 2005 par le CEA et le CNRS comme unité mixte de service (UMS N°2920). Cet outil stratégique, à l'échelle nationale, permet de sélectionner les évolutions scientifiques les plus marquantes dans le secteur des nanosciences et nanotechnologies, et de suivre au plus près ces évolutions. Devenu indispensable à la communauté, outil important d'aide à la décision, il est important que ce service soit pérennisé.

[8] Lancé en 2004, le réseau de Centre de compétences en nanosciences « C'Nano » s'appuie sur 6 centres de compétences régionaux. L'activité de C'Nano inclut l'animation scientifique, la cartographie des NST et la promotion de l'interface entre académie et industrie. Devenu un élément important de cohérence de la communauté scientifique, il est essentiel que ses actions soient pérennisées.

[9] Lequel anime l'effort de ressourcement du CEA dans le domaine, finance des projets transversaux aux directions opérationnelles du CEA, et poursuit une action de représentation et de connexion à l'international.

[10] Le Club nanoMétrologie a été créé en 2011 par le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE) et le CNRS à travers le réseau C'Nano. Il fédère aujourd'hui plus de 340 membres dont une centaine d'industriels (start-up, PME, grands groupes).

Les objectifs spécifiques d'une telle coordination devraient comprendre :

- L'identification des contributions des nanosciences et nanotechnologies aux filières industrielles stratégiques, et des technologies transversales à plusieurs filières, identification indispensable pour sous-tendre la décision publique[11].
- La priorisation en tenant compte des spécificités et de l'originalité des recherches françaises en nanosciences et nanotechnologies, des besoins des filières stratégiques nationales, des axes scientifiques et technologiques d'avenir ou de l'approche *safer by design*.
- La coordination des actions nationales dans divers domaines, dont
  - la valorisation, avec l'ambition d'assurer la continuité du financement des projets à fort potentiel, en interface avec les différents acteurs existants (tels que ANR, SATT, organismes de recherche, ministère de l'industrie, BPI…).
  - la veille et la prospective scientifique (cf. l'action recommandée précédemment : «la veille et la prospective scientifique et technologique »).
  - le soutien aux plateformes technologiques (cf. l'action recommandée précédemment : «les outils transversaux, les plateformes technologiques »).
  - la coordination et l'animation de la recherche publique, particulièrement importante dans un domaine aussi transversal que les nanosciences et nanotechnologies, afin de favoriser
    - les synergies entre les acteurs Français
    - l'émergence de projets de recherche multipartenaires et pluridisciplinaires
    - la diffusion et la valorisation des connaissances
- La coordination avec les partenaires clefs, dont la France, et les actions pertinentes de la Commission Européenne, dont le programme cadre de recherche et de développement (H2020).
- Une force, ou du moins une capacité de mobilisation, d'expertise sur les projets d'évolution des cadres règlementaire (national, européen et international) et législatif. Elle devrait particulièrement viser le renforcement de la présence et de l'influence française dans les instances de normalisation relatives aux nanotechnologies, européennes et internationales.
- Le portage d'actions de mise en visibilité des atouts et acteurs français dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies, dans une logique de renforcement de l'attractivité de ces acteurs, et du territoire national.
- Le renforcement des actions dans le domaine de l'éducation[12]. Cette action, essentielle, pourrait se compléter d'actions d'information vers le grand public, comme celles que les Pays-Bas ou l'Allemagne ou encore la France ont pu conduire.

La mise en œuvre de ces recommandations pourrait prendre plusieurs formes, sachant qu'elles se situent par nature dans le **cadre d'une action permanente, interministérielle.**

En synthèse du rapport précité[13], cette nécessité d'une coordination des politiques publiques est clairement affirmée :
« *Il est indispensable de créer et de faire vivre dans le temps une mission de coordination des politiques publiques relatives aux Nanotechnologies (NT), afin de remédier à tous les inconvénients d'une action*

[11] La correspondance entre domaines des nanosciences et nanotechnologies et filières industrielles est mis en évidence dans ce rapport.
[12] Par exemple en développant des actions réussies, comme nano-école (www.nano-ecole.fr).
[13] Rapport préparé par les Inspections Générales de plusieurs Ministères « *Déploiement industriel des nanotechnologies et de la biologie de synthèse sur les territoires précurseur des manufactures du futur* », publié en décembre 2013.

publique qui reste dispersée et peu lisible. A défaut, le repli des initiatives et leur absence de synergie risquent de conduire à une sanction économique lourde pour la France, alors qu'elle dispose de talents scientifiques et industriels sur les territoires, et de dispositifs publics d'accompagnement pour réussir en ces domaines porteurs des manufactures du futur. Une gouvernance interministérielle nouvelle est proposée dans le rapport. »

3- Résultats des travaux conduits dans les différents axes du projet

3-1- Prospective scientifique et technologique dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies, préparée en appui sur l'OMNT

Méthodologie, moyens mis en œuvre

La prospective scientifique réalisée dans le cadre de l'Axe 1 de l'ARP 4N, a été conçue, pilotée et mise en œuvre par l'OMNT (Observatoire des Micro- et Nano-Technologies).
Ont contribué à mener le travail de prospective scientifique, le personnel de l'OMNT (CEA et CNRS) :

- ***Pilotage et coordination scientifique*** *: Sébastien BERGER, Patrice RANNOU*
- ***Animation thématique*** *: Thierry BILLON, Nicolas BREFUEL, Aïcha GHARBI, Françoise HENRIO, Thierry PRIEM, Emma RICHET*
- ***Support technique et logistique*** *: Catherine LO CICERO, Fanny VEDEL*
- ***Expertise scientifique :*** *64 scientifiques français (la composition des groupes de travail est indiquée après chaque fiche thématique) avec le soutien des groupes d'experts de l'OMNT.*

Contraintes et prérequis pour la prospective scientifique

L'évolution des connaissances scientifiques à long terme est impossible à prévoir de manière précise, et même l'établissement de scénarios prétendant présenter l'ensemble des futurs possibles pour le champ des savoirs considéré, ne constitue pas un objectif raisonnable. Néanmoins, il est **possible d'estimer le potentiel de développement d'un ensemble d'axes de recherche actuels, autrement dit d'évaluer les orientations et les promesses pour l'avenir qu'ils portent en eux à l'instant présent**.
Il ne s'agit pas de deviner la cartographie des connaissances dans le futur, mais d'identifier les sujets qui semblent porteurs d'un avenir scientifique fort. Quels sont, parmi les innombrables thèmes abordés par les communautés scientifiques, les défis majeurs pour la connaissance ou les développements technologiques ? Ces défis identifiés, quelles sont les voies les plus prometteuses pour les relever, quelle évolution en découle pour les sujets de recherche concernés ?
Bien évidemment, une feuille de route précise n'est pas non plus envisageable, mais **des échéances approximatives peuvent être associées à cette vision de l'avenir**. On comprend aisément que seule une connaissance pointue des sujets scientifiques, de leurs enjeux, de leurs interactions avec les autres sujets et disciplines, et de leurs dynamiques passée et présente, permet de réaliser un tel exercice de prévision, projeté sur une échelle de temps raisonnable.
L'exercice est nécessairement collectif. En effet, il porte une part de subjectivité, liée au caractère partiel des connaissances détenues par l'expert qui réalise la prévision, laquelle sera enrichie, voire modifiée, par l'apport de points de vue différents. De plus, s'agissant des nanosciences et nanotechnologies, les problématiques sont éminemment pluridisciplinaires et leur évolution ne peut être considérée que dans une perspective interdisciplinaire, voire de convergence disciplinaire.

Choix méthodologique, moyens mis en œuvre et format des résultats

Pour toutes ces raisons, l'OMNT a suivi, dans le cadre des travaux conduits pour l'ARP, un **mode opératoire privilégiant la discussion entre des experts scientifiques actifs au meilleur niveau dans leurs domaines.**

Un premier travail a visé à définir des cadres thématiques cohérents[14]. Ces cadres ont permis de converger vers une liste de thèmes d'intérêt, et d'offrir aux experts une trame de discussion à la fois ouverte et pertinente. Un format contraint a été imposé pour restituer cette réflexion (voir plus bas), permettant une lecture facile de l'ensemble des analyses.

Les étapes de travail ont été les suivantes :

- Définition des thèmes à couvrir : une étape de réflexion et d'échange au sein des 14 groupes thématiques de l'OMNT (environ 120 experts mobilisés pour ces réunions) a permis d'identifier un corpus détaillé d'axes de recherche. Après un travail d'homogénéisation et de partition, ils ont été regroupés en 11 thèmes.
- Prospective : une étape d'élaboration de la prospective réalisée par des groupes de travail spécifiques et restreints (un pour chacun des 11 thèmes, 64 experts mobilisés en tout). Chacun de ces groupes a tenu deux réunions de travail, visant à redéfinir, affiner, formuler les axes de recherche et à évaluer leur évolution dans la durée, ainsi qu'à produire les informations nécessaires à la réalisation des fiches finales (voir plus bas).

Les attendus de la prospective scientifique demandée, sont les axes de développement les plus prometteurs à 5 ans d'une part, à 15-20 ans d'autre part :

- Les axes de recherche à 5 ans sont ceux faisant l'objet de travaux en forte progression ou en émergence rapide, et pour lesquels on peut raisonnablement attendre des résultats déterminants à une échéance de quelques années.
- Les axes de recherche à 20 ans sont les sujets considérés comme les verrous majeurs à long terme pour la compréhension ou/et les applications liées aux nanosciences et nanotechnologies.

Les 11 thèmes identifiés sont pour 7 des domaines identifiés au regard des applications (DA) et pour 3 des domaines transversaux (DT). Il s'y ajoute la thématique de la nano-toxicologie :

- Nano-électronique (DA)
- Electronique moléculaire & organique (DA)
- Photovoltaïque (DA)
- Stockage électrochimique et récupération d'énergie (DA)
- Modélisation, simulation & design : du nano-objet au dispositif (DA)
- Nano-biotechnologies, nano-médecine (DA)
- Nano-photonique (DA)

- Nano-caractérisation & nano-métrologie (DT)

- Nano lithographie et nano fabrication (DT)
- Nano-objets : dimension < 100nm & propriétés différentes du volume (DT)

- Nano-toxicologie : santé et environnement (DT)

[14] Ces thèmes, identifiés plus loin, recouvrent de vastes pans des nanosciences et nanotechnologies. Chacun constitue un ensemble cohérent pour le travail d'analyse des experts et pour la restitution dans ce rapport, par exemple à l'usage d'une agence de financement de la recherche. Il convient cependant de souligner que la couverture thématique ne peut, dans le cadre d'un projet tel que celui-ci et sur un domaine aussi dynamique et large que celui des nanosciences et nanotechnologies, prétendre à l'exhaustivité.

Ces champs ne représentent pas une couverture exhaustive des domaines impactés par les nanosciences et nanotechnologies, et pourraient être complétés sur certains points. Ils permettent cependant d'apprécier pleinement la dynamique du domaine et d'en donner une vision approfondie sur sa plus grande part.

Afin que l'ANR dispose d'un support auto-suffisant, pratique et diffusable, la restitution de la prospective scientifique est proposée à travers des fiches formatées et volontairement synthétiques. Ces 11 fiches, rassemblées plus loin, comprennent :

- La liste des voies de recherche porteuses de développements prometteurs à court terme (5 ans).
- La liste des voies de recherche jugées stratégiques à long terme (15-20 ans).
- Pour chacun de ces axes, leur correspondance avec les grands défis sociétaux de l'ANR d'une part et les *Key Enabling Technologies* (KETs) d'autre part est indiquée.
- Une illustration, sur un axe de recherche pris en exemple, d'un travail plus approfondi pouvant être mené, qui en détaille les différents aspects et liste les compétences disciplinaires requises.
- La liste des experts impliqués dans le groupe de travail

Par ailleurs, en développant une vision à long terme sur un ensemble de thèmes dont beaucoup sont par nature transverses, on voit se dégager quelques lignes de force, des thèmes qui apparaissent comme des défis incontournables pour le développement dans la durée des nanosciences et nanotechnologies, dans leur ensemble. Ces « Défis transverses » sont listés dans le paragraphe de résultats.

Enfin, dans le paragraphe « Analyse de la situation de la communauté française de recherche », une analyse très succincte des forces, faiblesses, opportunités et menaces (SWOT : *Strength, Weakness, Opportunities, Threats*) concernant la communauté française de recherche vis-à-vis du développement des nanosciences et nanotechnologie est présentée.

Recommandations pour la lecture

Afin d'exploiter de manière pertinente les résultats de la prospective scientifique ici conduite, la prudence requise doit être observée lors de son interprétation. A cette fin, plusieurs remarques doivent être prises en compte :

- Les axes jugés prioritaires à court terme ne doivent pas être considérés comme des sujets sans lendemain : ils sont au contraire, très généralement, des thèmes prometteurs à plus long terme. De même, les axes jugés prioritaires à long terme doivent être soutenus sans attendre, pour avoir une chance d'aboutir et, au niveau national, assurer la compétitivité de la recherche publique et des acteurs industriels. Autrement dit, la dichotomie court/long terme réfère plus à l'échéance d'avancée et d'impact sur un développement scientifique et technologique qu'à la pertinence d'un effort immédiat sur l'axe.
- Comme rappelé plus haut, il est très hasardeux de s'avancer sur des prévisions à 20 ans dans le domaine scientifique. Les experts rassemblés par l'OMNT ont accepté de travailler sur une vision prospective et ont donné des orientations en toute bonne foi, en fonction de l'état des choses à l'instant présent. C'est pourquoi ce travail n'aura de réel sens et d'utilité à terme, que s'il est renouvelé régulièrement, et que si un suivi rétrospectif et prospectif est mis en place.
- L'exemple de focus au verso de chaque fiche n'est pas le sujet prioritaire de la thématique : il est donné à titre d'exemple pour montrer un type d'approfondissement pouvant être mené sur chacun des axes listés. Il illustre ainsi ce que pourrait apporter un déploiement plus ample de la méthodologie de travail mise en œuvre, déploiement qui ne pouvait être réalisé dans le cadre de l'ARP.

Notons que les axes de recherche présentés n'ont pas des intitulés et des degrés de description parfaitement homogènes ; ils doivent être considérés, dans un thème donné, comme une manière de structurer les sujets de recherche prioritaires, sans être pour autant exclusifs ni exhaustifs

L'absence de prospective condamne l'action publique et la recherche à des choix non informés. En corolaire, l'appui indispensable sur la prospective doit être cependant conduit avec une vision claire des limites de l'exercice, et particulièrement avec la conscience du besoin de revisiter régulièrement les prévisions faites.

Défis transverses

Le travail de prospective multidisciplinaire mené par l'OMNT a permis de faire ressortir, au-delà des axes de recherche porteurs des grandes ruptures à court et à long terme, quelques thèmes considérés comme des enjeux majeurs par la plupart des disciplines.

Il s'agit de **connaissances, savoir-faire, outils, pouvant être considérés comme incontournables pour le développement des nanosciences et nanotechnologies dans leur ensemble, et ce de manière transversale à de nombreuses disciplines de recherche et domaines applicatifs**.

A ce titre, ils doivent être développés et soutenus dans la durée :

- **fabrication :**
  - design, fabrication, intégration de nano-objets/systèmes multifonctionnels
  - assemblage multi-échelle et architectures/systèmes complexes
  - maîtrise des interfaces à l'échelle nanométrique
  - assemblages bio-inspirés et interfaçage avec le vivant
- **caractérisation :**
  - caractérisation dynamique en environnements spécifiques (*in situ*, *operando*…) ;
  - techniques de caractérisation multi-échelle et couplées/multimodale
- **modélisation/simulation :**
  - modélisation multi-échelles/multi-physiques,
  - multi-échelle temporel et temps réel
  - appréhension de la complexité : interfaces, processus complexes
- **problématiques industrielles et sociétales**
  - compatibilité des nanoparticules et nanomatériaux avec les procédés industriels
  - durabilité, stabilité et fiabilité des nanomatériaux
  - étude du cycle de vie des nanomatériaux et matériaux critiques

Analyse de la situation de la communauté française de recherche

Chaque groupe thématique a mené un travail d'analyse des « forces, faiblesses, opportunités, menaces » (SWOT : *Strength, Weakness, Opportunities, Threats*) concernant la situation de la communauté française de recherche vis-à-vis du thème qu'il avait à traiter. Les tableaux présentant ces analyses sont présentés en fin de chaque fiche.

Quelques éléments d'analyse se retrouvent presque unanimement pour l'ensemble des thèmes. Ces dénominateurs communs des analyses équivalentes menées pour chacun des 11 thèmes sont reproduits ci-dessous. Il peut donc être considéré que cette synthèse s'applique à l'ensemble de la communauté de recherche française liée aux nanosciences et nanotechnologies.

FORCES	FAIBLESSES
• Expertises sur l'ensemble des maillons requis • Equipes reconnues internationalement • Continuité scientifique grâce au statut des chercheurs • Culture de l'interdisciplinarité	• Barrières à l'interdisciplinarité (financements, infrastructures, recrutements) • Difficulté à mener des projets de recherche complexes, structurants et sur la durée • Manque de financements publics • Frilosité des industriels • Faible soutien institutionnel à la valorisation
OPPORTUNITES	MENACES
• Financements européens : ERC, vision multiKETs… • Réponse à des attentes sociétales (transition énergétique, santé, problématiques matériaux)	• Structuration forte/programmes volontaristes dans d'autres pays (Asie, USA, France) • Poids des réglementations • Incertitudes sur la pérennité des financements

Tableau 1 : analyse SWOT de la communauté française de recherche vis-à-vis du développement des nanosciences et nanotechnologies

Remarque : l'ensemble de ces analyses constitue la vision *d'une partie* de la communauté de recherche française, et doit être considéré comme tel. Il s'agit d'une auto-analyse, qui mérite d'être approfondie et étayée par d'autres éléments.

FICHE THEMATIQUE « NANOELECTRONIQUE »

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS / RUPTURES ATTENDUES

A : Nouveaux matériaux (multi)fonctionnels et procédés associés pour la nanoélectronique et intégration hétérogène ; croissance hétérogène des III-V sur silicium
B : Transistors haute performance / basse consommation / haut rendement
C : Composants intégrés de récupération d'énergie (thermique, mécanique, électromagnétique), nanothermique
D : Nouvelles mémoires non volatiles et stockage de l'information
E: Architectures innovantes: reconfigurable, reprogrammable, 'logic in memory', asynchrone
F : Paradigmes alternatifs de traitement de l'information
G : Intégration 3D : interconnexions, logique/mémoire, capteurs
H : Nanocomposants pour la RF

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION ET APPLICATIONS

I : Matériaux et composants ultimes, contrôlés à l'échelle moléculaire et atomique
J : Nouveaux concepts pour le traitement et le stockage de l'information, calcul adiabatique
K : Ingénierie quantique
L : Stockage 3D et ultime
M : Architectures bio-inspirées, neuro-inspirées

GRILLES DE LECTURE ANR / H2020-KETS

Grille ANR : Grands Défis Sociétaux (GDS) & Aux Frontière de la Recherche (FR) : Défi de tous les Savoirs (DefSav)/OH Risque (OH)

GDS FR DefSAV OH	Gestion sobre des ressources	Energie, propre, sûre et efficace	Stimuler le renouveau industriel	Vie, santé et bien-être	Sécurité alimentaire défi démo-graphique	Mobilité et systèmes urbains durables	Société de l'information & commun.	Société innovante intégrante adaptative	Liberté et sécurité de l'Europe	FR : Défi de tous les savoirs & OH Risque
A			☒				☒	☒	☒	☒
B			☒	☒			☒	☒	☒	☒
C		☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒
D			☒				☒	☒	☒	☒
E			☒				☒	☒	☒	☒
F			☒				☒	☒	☒	☒
G			☒	☒			☒	☒	☒	☒
H			☒				☒	☒	☒	☒
I	☒	☒	☒				☒	☒	☒	☒
J							☒		☒	☒
K			☒				☒		☒	☒
L			☒				☒	☒	☒	☒
M	☒		☒	☒			☒	☒	☒	☒

Grille H2020: Key Enabling Technologies (KETs)

KETs	Photonics	Nanotechnology	Biotechnology	Advanced Materials	Micro/Nano-Electronics	Advanced Manufacturing
A	☒	☒		☒	☒	☒
B		☒		☒	☒	☒
C		☒		☒	☒	☒
D		☒		☒	☒	
E		☒		☒	☒	☒
F		☒				
G	☒	☒	☒	☒	☒	☒
H		☒		☒	☒	
I	☒	☒	☒	☒	☒	☒
J	☒	☒			☒	
K	☒	☒			☒	
L	☒	☒	☒	☒	☒	☒
M	☒	☒	☒	☒	☒	☒

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL : Christian BRYLINSKI (CNRS-AMPERE), Sylvain DELAGE (III-V Lab), Bernard DIENY (CEA-Inac), Mireille MOUIS (CNRS-IMEP), Marc SANQUER (CEA-Inac), Thomas SKOTNICKI (STMicroelectronics), Frédéric VAN DAU (Thales), Thierry BILLON (CEA-LETI)

EXEMPLE DE FOCUS

CAPTEUR AUTONOME COMMUNIQUANT

DESCRIPTION SUCCINCTE :
Capteur autonome communicant

Composant micrométrique intégrant les aspects de capteur, traitement de l'information, communication et alimentation en énergie à partir de l'environnement opérationnel. Cela implique de développer des transistors, mémoires, composants RF/optiques et capteurs très faible consommation et des composants de récupération et conversion d'énergie à haut rendement. Cela fait également appel à des problématiques d'intégration 3D et hétérogène. Cela implique enfin des activités avec différents horizons de recherche, du prototypage pour co-intégrer des solutions existantes en présence de piles par exemple, jusqu'à des sujets à long terme pour parvenir à une autonomie énergétique complète.

COMMUNAUTES CONCERNEES :
Capteur autonome communicant

- Micro-nanoélectronique sur Si, intégration ou transfert sur substrat flexible.
- RF et électromagnétisme.
- Spintronique (mémoires, RF, capteurs).
- En fonction du type de capteur : chimistes, biologistes, spécialistes de magnétisme, thermique et mécanique aux échelles micro et nanométriques.
- Technologues.
- Traitement du signal, gestion de l'énergie.
- Conception basse consommation.

SWOT (périmètre : COMMUNAUTE FRANCAISE)
Capteur autonome communicant

FORCES	FAIBLESSES
• Forte expertise scientifique/leadership (FDSOI, spintronique…) • Présence de tous les niveaux et compétences requises, académiques et industrielles, regroupées dans des centres technologiques • Existence de nombreux laboratoires susceptibles de contribuer au développement des projets de capteurs autonomes pour une grande variété d'applications	• Manque de financement d'un projet sur le long terme ; • Cloisonnement des communautés scientifiques ; difficulté de lancer et conduire des projets pluridisciplinaires • Difficulté à valoriser la R&D (création de start-ups, engagement des industriels, faiblesse de la reconnaissance académique de ce type d'activité…)
OPPORTUNITES	**MENACES**
• Présence d'industriels de la nanoélectronique en France et en Europe, ayant une stratégie de R&D • Présence de start-ups des capteurs et de la conception • Existence d'industriels intégrateurs (avionique, automobile, santé, internet des objets…) • Nombreux usages liés à des enjeux sociétaux (santé, environnement, sécurité, surveillance des infrastructures) • Essor de l'internet des objets	• Présence d'industriels dominants hors Europe • Programmes importants concurrents avec importants financements publics de la recherche dans des pays asiatiques/américains

FICHE THEMATIQUE : « ELECTRONIQUE MOLECULAIRE & ORGANIQUE »

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS / RUPTURES ATTENDUES

Molécules & Matériaux :	**A** : Auto-assemblage & hiérarchisation (supra)moléculaire : molécules, substrats & chimie 2D *in situ*.
	B : Synthèse à grande échelle & formulation écoresponsable de semi-conducteurs organiques (SCO)
	C : Dopage *p* et *n* contrôlé des SCOs
	D : Electronique imprimée sur substrat flexible & Electronique organique biocompatible
Phénomènes & Caractérisations :	**E** : Localisation, séparation et transfert de charges intra et inter-moléculaire
	F : Processus redox en milieux confinés
	G : Interfaces substrat/molécule & des hétérojonctions (SCO/SCO, SCO/Métal, SCO/isolant)
	H : Etude de la réponse dynamique/de la bande passante de composants organique/moléculaire
	I : Spintronique moléculaire et organique
Composants & Intégration	**J** : Substrats grands gaps et isolants pour intégration coplanaire de composants moléculaires
	K : Composant à nombre fini de molécules (taille < 20nm^3)
	L : Convergence des techniques d'auto-assemblage moléculaire vs. Lithographie conventionnelle

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

Molécules & Matériaux	**M** : Matériaux à conductivité mixte (ionique & électronique)
	N : SCO bio-ressourcés (ADN/ARN, protéines) et bio-inspirés
Phénomènes & Caractérisations	**O** : Compréhension du transport de charges (e^-,h^+ & spin) aux interfaces & dans une molécule
	P : Maitrise des processus photophysiques aux interfaces & à l'échelle de la molécule unique
	Q : Couplage plasmonique/(opto)électronique moléculaire et organique
Composants & Intégration	**R** : Architectures neuromorphiques
	S : Packaging et intégration : lithographie et encapsulation
	T : Manipulation de molécules à l'échelle atomique sur grande surface
	U : Transduction à base de molécule unique

GRILLES DE LECTURE ANR / H2020-KETS

Grille ANR : Grands Défis Sociétaux (GDS) & Aux Frontière de la Recherche (FR) :
Défi de tous les Savoirs (DefSav)/OH Risque (OH)

GDS FR DefSAVOH	Gestion sobre des ressources	Energie, propre, sûre et efficace	Stimuler le renouveau industriel	Vie, santé et bien-être	Sécurité alimentaire défi démo-graphique	Mobilité et systèmes urbains durables	Société de l'information & commun.	Société innovante intégrante adaptative	Liberté et sécurité de l'Europe	FR : Défi de tous les savoirs & OH Risque
A	☒	☒	☒			☒	☒			☒
B	☒	☒	☒			☒	☒			☒
C	☒						☒			☒
D	☒			☒		☒	☒			☒
E	☒	☒					☒			☒
F	☒	☒	☒			☒				☒
G	☒	☒	☒				☒			☒
H	☒	☒	☒				☒			☒
I			☒				☒			☒
J			☒				☒			☒
K	☒		☒				☒			☒
L	☒		☒				☒			☒
M	☒	☒	☒				☒			☒
N	☒	☒	☒				☒			☒
O			☒				☒			☒
P			☒				☒			☒
Q			☒				☒			☒
R			☒				☒			☒
S	☒	☒	☒				☒			☒
T			☒				☒			☒
U		☒				☒				☒

Grille H2020: Key Enabling Technologies (KETs)

KETs	Photonics	Nanotechnology	Biotechnology	Advanced Materials	Micro/Nano-Electronics	Advanced Manufacturing
A	☒	☒		☒	☒	☒
B	☒	☒	☒	☒	☒	☒
C	☒	☒		☒	☒	
D	☒	☒	☒	☒	☒	☒
E	☒	☒		☒	☒	
F		☒		☒	☒	
G		☒		☒	☒	
H		☒		☒	☒	
I	☒	☒		☒	☒	- /☒
J	☒	☒		☒	☒	☒
K	☒	☒		☒	☒	☒
L	☒	☒		☒	☒	☒
					☒	
M	☒	☒		☒	☒	☒
N		☒	☒	☒	☒	☒
O	☒	☒		☒	☒	
P	☒	☒		☒	☒	
Q	☒	☒		☒	☒	☒
R	☒	☒		☒	☒	☒
S	☒	☒			☒	☒
T	☒	☒			☒	☒
U		☒			☒	☒

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL : Erik DUJARDIN (CNRS-CEMES), Jean-Louis FAVE (CNRS-INSP), Gilles HOROWITZ (CNRS-LPICM), Jean-Christophe LACROIX (U. Paris Diderot-ITODYS) & Patrice RANNOU (CNRS-SPrAM)

EXEMPLE DE FOCUS
TRANSPORT ELECTRONIQUE/IONIQUE ET PROCESSUS PHOTO-PHYSIQUE DANS LES MATERIAUX MASSIFS, AUX INTERFACES ET JUSQU'A L'ECHELLE DE LA MOLECULE UNIQUE

DESCRIPTION SUCCINCTE
Transport électronique/ionique et processus photo-physique dans les matériaux massifs, aux interfaces et jusqu'à l'échelle de la molécule unique

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS/RUPTURES ATTENDUES

Molécules & Matériaux : Dopage *p* et *n* contrôlé des SCOs
Phénomènes & Caractérisations : Interfaces substrat/molécule & des hétérojonctions (SCO/SCO, SCO/Métal, SCO/isolant)
Composants & Intégration : Composant à nombre fini de molécules (taille < 20nm^3)

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

Molécules & Matériaux : Matériaux à conductivité mixte (ionique & électronique)
Phénomènes & Caractérisations : Couplage plasmonique/(opto)électronique moléculaire et organique
Composants & Intégration : Manipulation de molécules à l'échelle atomique sur grande surface

COMMUNAUTES CONCERNEES
Transport électronique/ionique et processus photo-physique dans les matériaux massifs, aux interfaces et jusqu'à l'échelle de la molécule unique

- **Chimie, Electrochimie, PhysicoChimie** : *De la molécule aux matériaux*
- **Physique** : *Transport de charges (e-, h+, spin) et Photophysique*
- **Microscopies à sonde locale** : *Imagerie et Spectroscopie (résolutions atomique & temporelle large bande)*
- **Théorie** : *Criblage, Modélisation et Simulation*
- **Micro/Nano-Technologies** : *Intégration endogène vs. Hétérogène et packaging*

SWOT (périmètre : COMMUNAUTE FRANCAISE)
Transport électronique/ionique et processus photo-physique dans les matériaux massifs, aux interfaces et jusqu'à l'échelle de la molécule unique

FORCES	FAIBLESSES
• Equipes & laboratoires compétitifs à l'échelle européenne & internationale • Socle de compétences pérennes & culture de l'interdisciplinarité • Réactivité et plasticité face aux nouveaux défis du 21ème siècle	• Organisation de la recherche française qui segmente par discipline • Fragmentation institutionnelle à l'échelle nationale • Déséquilibre de financement aval/amont
OPPORTUNITES	**MENACES**
• Marchés identifiés en forte croissance (Energie, TIC, Mobilité) • Contexte industriel favorable (Investissements sur l'électronique organique et moléculaire) • Sujet identifié comme une des priorités thématiques (KETs et Multi-KETs) du programme H2020	• Niveau insuffisant des financements sur cette thématique à l'échelle européenne (sauf en France) • dilution de l'effort de recherche par la multiplication des guichets • Diminution de l'efficacité par la multiplicité des structures recherches

FICHE THEMATIQUE « PHOTOVOLTAÏQUE »

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS / RUPTURES ATTENDUES

A : Développement de matériaux transparents conducteurs
B : Nanostructures actives et nanomatériaux (nano-objets semiconducteurs pour l'ingénierie de gap) : cellules à jonction radiale, cellules à colorant, copolymères, pérovskites, …
C : Architectures pour optimiser la conversion (absorption, dissociation des charges, transport) : multijonctions, up/down-conversion, cellules à bande intermédiaire, porteurs chauds…
D : Modélisation multi-échelle et 3D, simulation couplée électrique-optique, voire thermique
E : Ingénierie optique : intégration de structures photoniques dans des cellules photovoltaïques
F : Durabilité et fiabilité : stabilité et vieillissement

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

G : Concepts innovants/architectures 3D, au-delà de la limite de Shockley-Queisser
H : Nouveaux concepts nanophotoniques : au-delà de la limite de Yablonovitch
I : Durabilité et fiabilité, stabilité et vieillissement : développement d'outils de modélisation adaptés pour la compréhension des phénomènes
J : Criblage des matériaux et architectures par modélisation et simulation numérique
K : Simulation intégrée (*ab initio, …*) pour la compréhension des phénomènes photophysiques
L : Hybridation des matériaux et technologies pour la conversion et le stockage
M : Compatibilité industrielle de nouveaux matériaux, structures
N : Substitution des matériaux critiques

GRILLES DE LECTURE ANR / H2020-KETS

Grille ANR : Grands Défis Sociétaux (GDS) & Aux Frontière de la Recherche (FR) : Défi de tous les Savoirs (DefSav)/OH Risque (OH)

GDS FR DefSAV OH	Gestion sobre des ressources	Energie, propre, sûre et efficace	Stimuler le renouveau industriel	Vie, santé et bien-être	Sécurité alimentaire défi démo-graphique	Mobilité et systèmes urbains durables	Société de l'information & commun.	Société innovante intégrante adaptative	Liberté et sécurité de l'Europe	FR : Défi de tous les savoirs & OH Risque
A		☒								☒
B		☒								☒
C		☒								☒
D		☒								☒
E		☒								☒
F			☒							
G		☒								☒
H		☒								☒
I		☒								
J		☒								
K		☒							☒	☒
L		☒				☒				
M			☒							
N										

Grille H2020: Key Enabling Technologies (KETs)

KETs	Photonics	Nanotechnology	Biotechnology	Advanced Materials	Micro/Nano-Electronics	Advanced Manufacturing
A		☒		☒	☒	
B	☒	☒		☒	☒	☒
C	☒	☒				
D	☒					
E	☒	☒		-/☒		
F	☒			☒		☒
G	☒	☒		☒	☒	
H	☒	☒		☒	☒	
I				☒		
J		☒		☒		
K	☒	☒				
L	☒	☒		☒		☒
M		☒		☒	☒	☒
N		☒		☒	☒	☒

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL : Christine DAGRON-LARTIGAU (Univ. Pau - IPREM), Alain DOLLET (CNRS-Promes), Pere ROCA CABARROCAS (CNRS-Ecole polytechnique-LPICM), Christian SEASSAL (ECL)

EXEMPLE DE FOCUS

NOUVEAUX CONCEPTS POUR LE PV : VERS LES TRES HAUTES PERFORMANCES

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS / RUPTURES ATTENDUES

ARCHITECTURES POUR OPTIMISER LA CONVERSION

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

CONCEPTS INNOVANTS/ARCHITECTURE 3D AU-DELA DE LA LIMITE DE SHOCKLEY-QUEISSER

DESCRIPTION SUCCINCTE :
nouveaux concepts pour le PV : vers les très hautes performances

Plusieurs concepts PV dits de 3ème génération conduisent théoriquement à des rendements proches de la limite thermodynamique (de l'ordre de 90%) sous concentration du flux solaire. Parmi ceux-ci, les porteurs chauds et les cellules à bande intermédiaire sont certainement ceux qui sont les plus exploratoires et qui bénéficieront le plus de travaux de recherche fondamentaux. En dépit des excellentes performances déjà atteintes (plus de 45% de rendement sous concentration solaire), les multijonctions de la famille des III-V disposent encore d'une marge de progression énorme en termes de performances et de réduction des coûts. Les pistes potentielles de gain portent notamment sur de nouvelles architectures permettant d'optimiser l'absorption, la dissociation et le transport de charges, la réémission de la lumière sous concentration, l'adaptation du spectre solaire (modification de l'énergie des photons par up et down conversion, par incorporation de plots quantiques…). A long terme, des architectures très innovantes, en particulier tridimensionnelles, ou encore des concepts en rupture tels que la génération multiple d'excitons (permettant de dépasser la limite théorique de Shockley-Queisser) ou d'autres qui restent à découvrir, pourraient ouvrir la voie à des rendements de conversion de l'énergie solaire supérieurs à 60 %

COMMUNAUTES CONCERNEES :
nouveaux concepts pour le PV : vers les très hautes performances

- ➔ Chimie, physique, y compris théorie et modélisation
- ➔ Science et génie des matériaux
- ➔ Ingénierie, micro&nanotechnologie, fabrication, caractérisation
- ➔ Optique/photonique
- ➔ Thermique

SWOT (périmètre : COMMUNAUTE FRANCAISE) :
Nouveaux concepts pour le PV : vers les très hautes performances

FORCES	FAIBLESSES
• Communauté académique structurée et de bon niveau comportant un spectre très étendu de compétences • Présence d'industriels français majeurs à l'état de l'art • Présence de PME innovantes	• Manque de moyens humains et financiers pour développer des sujets à long terme • Manque de certains moyens technologiques à échelle suffisante en France
OPPORTUNITES	**MENACES**
• Renforcement possible du lien entre la communauté scientifique et le tissu industriel, au-delà d'acteurs purement PV • Transition énergétique au niveau français et européen	• Risque de voir privilégier les solutions éprouvées • Concurrence des pays qui investissement massivement dans les technologies à risque (USA, Australie, Asie)

FICHE THEMATIQUE
« STOCKAGE ELECTROCHIMIQUE ET RECUPERATION D'ENERGIE »

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS / RUPTURES ATTENDUES

A : Compréhension des phénomènes à l'échelle nano en fonctionnement (performances, vieillissement,…) : caractérisation en environnement spécifique et *operando*, techniques couplées (ex : analyse structurale/électrochimique) et modélisation associée
- Ingénierie de la composition et de la structuration à l'échelle nano : **B** : géométrie : conception et procédés de fabrication ; **C :** maîtrise des phénomènes et modification contrôlée aux interfaces liées à la nanotexturation ou à la présence de nano-objets ; **D** : associations synergiques de matériaux multifonctionnels
E : Durabilité des nanomatériaux
F : Prise en compte de la compatibilité de solutions nanos avec les procédés industriels et les aspects réglementaires
G : Stockage H_2 : compréhension des mécanismes d'absorption/désorption de l'H_2 dans les hydrures

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

H : Compréhension et maîtrise des interfaces complexes, multiphysiques dans des systèmes hybrides (thermoélectricité-batteries et piles à combustible-photovoltaïque-…)
I : Ingénierie de la composition et de la structuration des électrodes et électrolytes à l'échelle nano : passage à l'échelle industrielle
J : Nanomatériaux et architectures bio-inspirés et biocompatibles (bio-piles à combustible,…), greffage moléculaire
K : Récupération/recyclage des nanomatériaux critiques (aspects écologiques et économiques)
L : Procédés d'élaboration intégrés de systèmes complexes sur des plateformes communes intégrant récupération/stockage, gestion de l'information ; compatibilité technologique de ces procédés avec le transfert industriel

GRILLES DE LECTURE ANR / H2020-KETS

Grille ANR : Grands Défis Sociétaux (GDS) & Aux Frontière de la Recherche (FR) : Défi de tous les Savoirs (DefSav)/OH Risque (OH)

GDS FR DefSAV OH	Gestion sobre des ressources	Energie, propre, sûre et efficace	Stimuler le renouveau industriel	Vie, santé et bien-être	Sécurité alimentaire défi démo-graphique	Mobilité et systèmes urbains durables	Société de l'information & commun.	Société innovante intégrante adaptative	Liberté et sécurité de l'Europe	FR : Défi de tous les savoirs & OH Risque
A		☒				☒				☒
B		☒	☒			☒				☒
C	☒	☒				☒				
D	☒	☒	☒			☒				☒
E	☒	☒	☒			☒				
F			☒			☒				
G		☒	☒			☒				☒
H	☒	☒				☒				☒
I	☒	☒	☒			☒				
J		☒	☒			☒				☒
K	☒	☒	☒			☒				☒
L		☒	☒			☒				☒

Grille H2020: Key Enabling Technologies (KETs)

KETs	Photonics	Nanotechnology	Biotechnology	Advanced Materials	Micro/Nano-Electronics	Advanced Manufacturing
A	☒	☒		☒		
B		☒		☒		☒
C		☒		☒		
D		☒		☒		
E		☒		☒		☒
F		☒		☒		☒
G		☒		☒		
H		☒				
I		☒		☒		☒
J		☒	☒	☒		☒
K		☒		☒		☒
L	☒	☒		☒	☒	☒

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL : Frédéric LE CRAS (CEA – Liten), Chritophe LETHIEN (Univ. Lille – IEMN), Thierry PRIEM (CEA – Liten), Gérard GEBEL (CEA – Inac), Bertrand LENOIR (Univ. Lorraine – IJL), Guillaume Savelli (CEA – Liten), Fabien FORMOSA (Univ. Savoie -SYMME)

EXEMPLE DE FOCUS

MAITRISE ET INGENIERIE DES INTERFACES

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS/RUPTURES ATTENDUES

MAITRISE DES PHENOMENES AUX INTERFACES A L'ECHELLE NANO

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

INTERFACES COMPLEXES, MULTIPROCESSUS ET MULTI-ECHELLE DANS DES SYSTEMES HYBRIDES (TE/BATT/PAC/PV)

DESCRIPTION SUCCINCTE
Maitrise et ingénierie des interfaces

Dans de nombreux domaines, la pleine expression des performances des matériaux fonctionnels au sein de dispositifs multi-matériaux nécessite à la fois la maîtrise des propriétés du matériau lui-même, mais également des interfaces qu'il partage avec son environnement. La composition, la structure, la morphologie de ces zones d'échange et de contact conditionnent en effet de plus en plus souvent des propriétés clefs (réactivité chimique, transfert ionique/électronique, thermique, électrique, mécanique, propriétés optiques, transfert de matière, interactions matière/rayonnement…), et ceci de manière particulièrement prégnante dans le domaine des nanomatériaux ou des matériaux nanostructurés. Il est donc primordial de maitriser les propriétés de ces interfaces (interphases). Afin de faire progresser la conception, la réalisation et les performances de tels dispositifs multi-matériaux complexes, il est primordial d'élaborer des outils de modélisation dédiés permettant de prendre en compte de l'ensemble des processus mis en jeu, et leur répercussion à différentes échelles.
Parallèlement, le développement de processus d'élaboration 'bottom-up' spécifiques devra être favorisé, en associant notamment des procédés originaux (impression 3D, auto-assemblage,…), des techniques *a priori* plus conventionnelles (tissage, impression de nanomatériaux), des composants nanostructurés (nanotubes, nanofils, structures cœur-coquille, matériaux lamellaires monocouche).

COMMUNAUTES CONCERNEES
Maitrise et ingénierie des interfaces

- ➔ Expérimentateurs, théoriciens
- ➔ Chimistes, physiciens
- ➔ électrochimiste, électrocatalyste
- ➔ ingénieurs procédés
- ➔ science et génie des matériaux
- ➔ modélisation (théoriciens et numériciens)
- ➔ nanocaractérisation
- ➔ réseaux : RS2E, GDR TE, GDR PACS, FedPV, Fedesol, Alistore…

SWOT (périmètre : COMMUNAUTE FRANCAISE)
Maitrise et ingénierie des interfaces

FORCES	FAIBLESSES
• Communauté structurée et reconnue à l'international • Expertise sur toute la chaine de compétences nécessaires au traitement du sujet • Présence de grands instruments (ESRF, Soleil, ILL, LLB…) et d'outils de nanocaractérisation	• Difficulté d'accès aux outils de caractérisation, en raison de leur nombre restreint • Coût des techniques d'analyse des interfaces • Investissement modéré des industriels français ; tissu industriel insuffisant dans la plupart des technologies • Sujets pluridisciplinaires : compréhension parfois difficile entre toutes les communautés (vocabulaire,…)
OPPORTUNITES	**MENACES**
• Transition énergétique au niveau français et européen	• Programmes structurants et d'envergure en Asie et aux

• Stockage de l'énergie concerné par le renouveau industriel • Demande sociétale de rupture technologique sur le stockage de l'énergie	USA • Faculté de transfert rapide du labo vers l'industrie en Asie et aux USA

FICHE THEMATIQUE
« MODELISATION, SIMULATION & DESIGN : DU NANO-OBJET AU DISPOSITIF »

Problématiques à 5 ans
SUJETS EMERGENTS / RUPTURES ATTENDUES

A : Modélisation hiérarchisée multi-échelle/multi-physique de propriétés structurales ou électronique
B : Amélioration des outils de modélisation existants : *DFT, KP/Masse Effective, Liaisons Fortes, Modélisation compacte, Exploration de l'espace des phases, simulations micro-magnétiques, simulation électrothermiques, micro/nano-fluidique*
C : Gestion de la complexité à une échelle donnée et à travers différentes échelles
D : Méthode de criblage intelligente/automatique pour appréhender la diversité des matériaux
E : Développement et accessibilité à des bases de données : mise à disposition & capitalisation des résultats
F : Poursuite du développement de moyens de calcul suffisants à l'échelle nationale et adéquation/coordination des moyens nationaux/européens

Problématiques à 15-20 ans
VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

G : Modélisation intégrée/continue multi-échelle/multi-physique de propriétés structurales ou électroniques
H : Phénomènes dépendant du temps ; multi-échelle temporel
I : Corrélations électroniques dans les systèmes complexes : interfaces et défauts
J : Phénomènes et processus complexes : Auto-assemblage et processus de hiérarchisation aux surfaces et interface (solide/liquide, biologique/non-biologique, organique/inorganique etc…)
K : Mise en synergie de la modélisation et de la nano-caractérisation ; métrologie en temps réel
L : Moyens de calculs suffisants (nationaux/européens) & adaptation aux nouveaux paradigmes de calcul intensif (massivement //)

GRILLES DE LECTURE ANR / H2020-KETS

Grille ANR : Grands Défis Sociétaux (GDS) & Aux Frontière de la Recherche (FR) : Défi de tous les Savoirs (DefSav)/OH Risque (OH)

GDS FR DefSAV OH	Gestion sobre des ressources	Energie, propre, sûre et efficace	Stimuler le renouveau industriel	Vie, santé et bien-être	Sécurité alimentaire défi démo-graphique	Mobilité et systèmes urbains durables	Société de l'information & commun.	Société innovante intégrante adaptative	Liberté et sécurité de l'Europe	FR : Défi de tous les savoirs & OH Risque
A	☒	☒	☒				☒			☒
B	☒	☒					☒			☒
C	☒	☒				☒	☒			☒
D	☒	☒	☒			☒	☒			☒
E		☒		☒	☒	☒	☒			☒
F		☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒
G	☒	☒	☒			☒	☒			☒
H	☒	☒	☒			☒	☒			☒
I	☒	☒					☒			☒
J	☒	☒		☒			☒			☒
K	☒	☒	☒	☒	☒		☒			☒
L	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒

Grille H2020: Key Enabling Technologies (KETs)

KETs	Photonics	Nanotechnology	Biotechnology	Advanced Materials	Micro/Nano-Electronics	Advanced Manufacturing
A	☒	☒		☒	☒	
B	☒	☒		☒	☒	
C	☒	☒	☒	☒	☒	☒
D	☒	☒	☒	☒	☒	☒
E	☒	☒	☒	☒	☒	☒
F	☒	☒	☒	☒	☒	☒
G	☒	☒		☒	☒	
H	☒	☒		☒	☒	
I	☒	☒	☒	☒	☒	☒
J	☒	☒	☒	☒	☒	☒
K	☒	☒	☒	☒	☒	☒
L	☒	☒	☒	☒	☒	☒

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL : Alain ESTEVE (CNRS-LAAS), Yann-Michel NIQUET (CEA-Inac), Damien QUERLIOZ (CNRS-IEF) & François TRIOZON (CEA-Leti)

EXEMPLE DE FOCUS

MODELISATION MULTI-ECHELLES ET MULTI-PHYSIQUES DE SYSTEMES COMPLEXES

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS/RUPTURES ATTENDUES

PHENOMENES ET PROCESSUS AUX SURFACES & INTERFACES SOLIDE/SOLIDE ET « HYBRIDES » ORGANIQUE/INORGANIQUE

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

PHENOMENES ET PROCESSUS D'AUTO-ASSEMBLAGE ET DE HIERARCHISATION AUX SURFACES & INTERFACES SOLIDE/LIQUIDE ET BIOLOGIQUE/NON-BIOLOGIQUE

DESCRIPTION SUCCINCTE :
Modélisation multi-échelles et multi-physiques de systèmes complexes

L'enjeu sera de développer des outils et méthodes pour la modélisation multi-physique et multi-échelles de phénomènes complexes, tels que ceux ayant lieu aux surfaces, interfaces et défauts dans les solides et dispositifs, et à plus long terme aux interfaces solides/liquides et aux interfaces matériaux organiques & biologiques/matériaux inorganique (y compris les processus d'auto-assemblage). Il faudra à cet effet être capable de faire coexister et de coupler différentes méthodes de calcul dans différentes parties du système (par exemple des descriptions atomistiques et milieux continus). Cela nécessitera d'importants développements méthodologiques et conceptuels (modalités de couplage entre méthodes, conditions aux limites, etc...), d'abord sur quelques briques de base, puis à l'échelle d'un système complexe

COMMUNAUTES CONCERNEES :
Modélisation multi-échelles et multi-physiques de systèmes complexes

- ➔ Modélisation numérique : *Chimie & Physique*
- ➔ Numéricien/spécialiste du calcul
- ➔ Nano-Caractérisation
- ➔ Micro/Nano-Electronique & Photonique
- ➔ Nano-Biotechnologies
- ➔ Matériaux avancés multifonctionnels
- ➔ Production et stockage de l'énergie
- ➔ Capteurs et actionneurs

SWOT (périmètre : COMMUNAUTE FRANCAISE)
Modélisation multi-échelles et multi-physiques de systèmes complexes

FORCES	FAIBLESSES
• Historique, culture, savoir-faire, et expertises reconnus • internationalement • Leadership établi sur des secteurs de la modélisation • Culture de l'interdisciplinarité	• Fragmentation de la recherche incompatible avec les objectifs de hiérarchisation des outils et modèles • Manque de projets structurants interdisciplinaires (modélisation/numéricien, aval/amont) • Masse critique insuffisante des équipes de modélisation : *incapacité à développer des codes de calculs complexes*
OPPORTUNITES	**MENACES**
• Besoin croissant pour la modélisation : *coût de l'innovation, réduction du time-to-market* • Développement des nano(bio)technologies : *Demandes industrielles et sociétales* • recherche Multi-KETs	• Montée en puissance du niveau de compétition internationale : *Asie et USA* • Soutiens d'industriels quasi-inexistants

FICHE THEMATIQUE « NANOBIOTECHNOLOGIES, NANOMEDECINE »

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS / RUPTURES ATTENDUES

A : Nanovectorisation/thérapie : nanoparticules multi-fonctionnelles, thérapie thermique par radiation, combinaison croisée de thérapies multiples

B : Ingénierie cellulaire et tissulaire : micro/nanomatériaux implantables, interaction nanomatériaux/cellules (diff. Cellulaire, migration…), interaction cellule-cellule et cellule-réseaux (réparation du système nerveux), développement d'architectures modèles multi-cellulaires, dispositifs intelligents (pansements, implants, prothèses)

C : Diagnostic et suivi thérapeutique : laboratoire d'analyse sur matériaux fibreux naturels (cellulose, soie) ou synthétiques, capteurs multifonctionnels (détection/transduction optique, électrique, mécanique…), systèmes de détection de cellules uniques et biomarqueurs circulants

D : Interfaçage neuronal : mesure et stimulation (biochimique/optique/électrique/mécanique) de l'activité neuronale, stabilité et biocompatibilité des électrodes

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

E : Nanovectorisation/thérapie : spécificité vis-à-vis d'un génotype ou d'un épi-génotype (analyses protéomique et métabolomique), franchissement des barrières biologiques, devenir à long terme

F : Systèmes à réponse biologique contrôlée : différentiation cellulaire *in vivo*, micro-environnement cellulaire *in vivo*, migration, construction de tissus 2D-3D multicellulaires et d'organes, biocompatibilité et intégration *in vivo*

G : Diagnostic et suivi thérapeutique : criblage de cellules (cartographie de l'hétérogénéité cellulaire), capteurs multifonctionnels *in vivo*, médecine « personnalisée »

H : Neurotechnologies : réparation de nerfs, prothèses implantables, stimulation de cellules souches, cartographie de l'activité du cerveau…

GRILLES DE LECTURE ANR / H2020-KETS

Grille ANR : Grands Défis Sociétaux (GDS) & Aux Frontière de la Recherche (FR) : Défi de tous les Savoirs (DefSav)/OH Risque (OH)

GDS FR DefSAV OH	Gestion sobre des ressources	Energie, propre, sûre et efficace	Stimuler le renouveau industriel	Vie, santé et bien-être	Sécurité alimentaire défi démo-graphique	Mobilité et systèmes urbains durables	Société de l'information & commun.	Société innovante intégrante adaptative	Liberté et sécurité de l'Europe	FR : Défi de tous les savoirs & OH Risque
A			☒	☒						☒
B			☒	☒						☒
C				☒						☒
D				☒						☒
E			☒	☒						☒
F			☒	☒						☒
G			☒	☒						☒
H			☒	☒						☒

Grille H2020: Key Enabling Technologies (KETs)

KETs	Photonics	Nanotechnology	Biotechnology	Advanced Materials	Micro/Nano-Electronics	Advanced Manufacturing
A		☒	☒	☒		
B		☒	☒	☒		☒
C		☒	☒	☒	☒	
D		☒	☒	☒	☒	☒
E		☒	☒	☒		☒
F		☒	☒	☒		
G		☒	☒		☒	
H		☒	☒	☒	☒	☒

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL : Jean-Marie DEVOISSELLE (Univ. Montpellier-ICG), Catherine LEVISAGE (Inserm), Laurent MALAQUIN (CNRS – Institut Curie), Pierre TEMPLE (CNRS-LAAS), Catherine VILLARD (CNRS – Institut Néel)

EXEMPLE DE FOCUS

NEUROTECHNOLOGIES

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS/RUPTURES ATTENDUES

Architectures neuronales et interfaces avec les réseaux de neurones *in vitro* et *in vivo* : ingénierie cellulaire et tissulaire, génie génétique, multi-détections/mesures/stimulations biochimique/optique (optogénétique) /électrique/mécanique, matériaux micro/nanostructurés

Nanovectorisation/thérapie : nanoparticules multi-fonctionnelles

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

Organe : médecine réparatrice ou régénératrice (cellule souche, reprogrammation cellulaire, construction de tissus 2D-3D multicellulaires (nerf), prothèse)

Interface homme-machine : implants, transmission/réception/traitement de données en temps réel

DESCRIPTION SUCCINCTE
Neurotechnologies

Les neurotechnologies ont la particularité de s'appuyer sur de nombreux champs disciplinaires ainsi que de couvrir tout le spectre de la recherche, de la plus fondamentale aux applications cliniques.

Il s'agit ici de comprendre les mécanismes de mise en place et de fonctionnement des réseaux neuronaux pour pouvoir les réparer *in vivo* (médecine régénératrice, et thérapies du système nerveux en général) ou pallier leurs défaillances (interface homme-machine). Ceci implique la mise en œuvre d'approches complémentaires alliant la biophysique et l'ingénierie cellulaire (et tissulaire) ainsi que la mesure et le contrôle de l'activité des réseaux par diverses voies (biochimique, optogénétique, mécanique, électrique) sur la base des avancées récentes en génétique et en micro-nanotechnologies.

COMMUNAUTES CONCERNEES
Neurotechnologies

-Chimistes et pharmaciens : *ingénierie des matériaux et procédés*
-Biologistes et médecins : *neurobiologistes, clinicien, neurochirurgien*
-Physiciens et biophysiciens, micro & nanotechnologues
-Théoricien, informaticien, numéricien : *traitement du signal et de données*
-SHS & Sciences cognitives : *bioéthique, psychologue, neurobiologiste*

SWOT (périmètre : COMMUNAUTE FRANCAISE)
Neurotechnologies

FORCES	FAIBLESSES
• Toutes les compétences présentes au niveau national et reconnues au niveau international • Biophysique : communauté reconnue internationalement • Micro-Nanotechnologies : communauté structurée en terme d'équipes et de plateformes (RTB) • Excellence reconnue de la communauté française de cliniciens • Quelques exemples d'instituts interdisciplinaires à suivre : Institut de la vision, CLINATEC etc….	• Cloisonnement des financements et des infrastructures : difficulté de développer des projets interdisciplinaires • Difficulté de recruter aux interfaces disciplinaires • Faible niveau de financement des projets interdisciplinaires, limitations administratives du recrutement de personnels temporaires • Fondations privées existantes mais ne finançant que les aspects cliniques
OPPORTUNITES	**MENACES**
• H2020 : human brain project • Besoins médicaux clairement identifiés (vieillissement, cancers, maladies neurodégénératives) • Plans gouvernementaux en réponses aux besoins	• Concurrence internationale forte • Fondations privées et mécénats très développés à l'étranger • Réglementation & règles de bioéthique différenciée selon

sociétaux	les pays • Coût de l'expérimentation animale, voire humaine

FICHE TRANSVERSE
« NANOCARACTERISATION & NANOMETROLOGIE »

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS / RUPTURES ATTENDUES

A : Caractérisation en environnement spécifique (conditions ambiantes, extrêmes, *in vivo*, *in situ*, *in operando, environnement libre-propriétés intrinsèques-découplage objets/substrats*)
B : Couplage de techniques en conservant un haut niveau de sensibilité et de résolution spatiale 2D & 3D (*in situ*) et présentant une large gamme dynamique de mesure
C : Coupler la caractérisation fonctionnelle à la caractérisation physique et chimique (*in situ*)
D : Fiabilité et incertitude de mesure, étalons, déplacements contrôlés et reproductibles à l'échelle nanométrique
E : Progrès instrumentaux en électronique de contrôle, traitement de données en temps réel, mesure du temps (bande passante)
F : Système de prélèvement & préparation de support/échantillon (repérage d'objet) : de l'objet unique à l'assemblée (homogène/hétérogène (défauts)) de nano-objets identiques
G : Nano-caractérisation/métrologie : support de la modélisation

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

H : Analyse chimique à l'échelle nanométrique ou atomique, détection, quantification de traces, de contaminants
I : Couplage de techniques multi-échelles et multimodales pour accéder à une information spécifique
J : Caractérisation dynamique (ultra-rapide) multi-échelle temporelle de paramètres physiques et chimiques
K : Détection à la limite quantique (force, masse, charge, spin, photon) et fiabilité : spectroscopie à l'échelle ultime
L : Modélisation & simulation numérique intégrées à la Nano-caractérisation/métrologie

GRILLES DE LECTURE ANR / H2020-KETS

Grille ANR : Grands Défis Sociétaux (GDS) & Aux Frontière de la Recherche (FR) : Défi de tous les Savoirs (DefSav)/OH Risque (OH)

GDS FR DefSAV OH	Gestion sobre des ressources	Energie, propre, sûre et efficace	Stimuler le renouveau industriel	Vie, santé et bien-être	Sécurité alimentaire défi démo-graphique	Mobilité et systèmes urbains durables	Société de l'information & commun.	Société innovante intégrante adaptative	Liberté et sécurité de l'Europe	FR : Défi de tous les savoirs & OH Risque
A			☒	☒	☒	☒	☒			☒
B			☒	☒	☒	☒	☒			☒
C			☒	☒		☒	☒			☒
D					☒					☒
E			☒				☒			☒
F			☒	☒	☒		☒			
G			☒		☒		☒			☒
H	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒
I			☒		☒		☒			☒
J										☒
K			☒							☒
L			☒				☒			☒

Grille H2020: Key Enabling Technologies (KETs)

KETs	Photonics	Nanotechnology	Biotechnology	Advanced Materials	Micro/Nano-Electronics	Advanced Manufacturing
A	☒	☒		☒	☒	
B	☒	☒		☒	☒	
C	☒	☒		☒	☒	☒
D	☒	☒			☒	☒
E		☒		☒	☒	☒
F		☒	☒	☒	☒	☒
G	☒	☒		☒	☒	☒
H	☒	☒	☒		☒ / ☒☒	☒ / ☒
I	☒	☒		☒		
J	☒	☒		☒	☒	☒
K	☒	☒		☒	☒	☒
L	☒	☒		☒	☒	☒

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL : Jean-François BARDEAU (CNRS-IMMM), Pascale BAYLE-GUILLEMAUD (CEA-Inac), Amal CHABLI (CEA-Liten), Georges FAVRE (LNE), Claude HENRY (CNRS-CINAM) & Serge HUANT (CNRS-Institut Néel)

EXEMPLE DE FOCUS

NANO-CARACTERISATIONS MULTI-TECHNIQUES INTEGREES

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS/RUPTURES ATTENDUES

COUPLAGE DE TECHNIQUES A HAUT NIVEAU DE SENSIBILITE ET DE RESOLUTION SPATIALE EN ENVIRONNEMENT SPECIFIQUE

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

MODELISATION & SIMULATION NUMERIQUE ANALYTIQUE ET PREDICTIVE EN TEMPS REEL INTEGREES A LA NANO-CARACTERISATION/METROLOGIE

DESCRIPTION SUCCINCTE : Nano-Caractérisations multi-techniques intégrées

Les performances ultimes des techniques de nanocaractérisation, parfois atteintes aujourd'hui pour des conditions optimisées, doivent pouvoir l'être lors de mesures en environnements spécifiques ou en temps réel afin d'être en mesure de recueillir des informations pertinentes et représentatives. Pour permettre une interprétation robuste des données et une compréhension fine des couplages fonctions/caractéristiques des matériaux, deux enjeux complémentaires doivent être addressés : i) la mise au point de méthodologies innovantes de préparation d'échantillon ciblant le couplage des techniques tout en conservant sensibilité et résolution spatiale et ii) le développement d'instrumentations permettant une obtention simultanée et quantitative (métrologie) de propriétés complètes/multiples (chimiques et physiques). Des matériaux de référence adaptés doivent être développés pour évaluer les performances de ces techniques de caractérisation, qui devront à terme pouvoir être couplées à la modélisation et à la simulation multi-échelle pour une caractérisation « intelligente ». Des actions de R&D prénormative doivent permettre d'harmoniser les pratiques et la comparabilité des résultats de mesure.

COMMUNAUTES CONCERNEES : Nano-Caractérisations multi-techniques intégrées

- Physiciens, chimistes, biologistes
- Micro-nanotechnologies
- Microscopie et spectroscopie ionique, électronique, optique, à sonde locale
- Equipementier (industriels, start-up) de la caractérisation
- Grands instruments
- Club nanoMétrologie
- Modélisation et théorie
- Analyse de surface

SWOT (périmètre : COMMUNAUTE FRANCAISE)
Nano-Caractérisations multi-techniques intégrées

FORCES	FAIBLESSES
* Expertises internationalement reconnues par techniques et domaines scientifiques * Adaptabilité et capacité à générer de nouvelles preuves de concepts (brevets) et des ruptures technologiques * Existence de communautés structurées par techniques * Instances/espaces d'échange regroupant académiques, organismes publics et industriels : Club/OMNT/GDR * Pilotage français du Comité Technique 352 (nanotechnologies) du CEN (comité européen de normalisation)	* peu de valorisation du travail de développement instrumental : Au-delà de la preuve de concept pour aller vers des instruments * Soutien à la valorisation (PI & Brevets) * Faible maillon industriel (start-up -> PME) * Cloisonnement thématique, de compétences et manque de coordination à l'échelle nationale (cf. dispersion des financements et duplication efforts) * Séparation française mondes académique & industriel * France absente de la Commission Technique de normalisation des nanotech pour l'électrotechnique, contribuant à l'orientation de techniques de caractérisation à développer
OPPORTUNITES	**MENACES**
*Besoins reliés à des domaines applicatifs et à la gestion de la complexité des NM dans leur environnement d'usage *pilotage et inflexions en faveur de la nano-caractérisation *Financement européen : Programme H2020, KETs et EMPIR (pour ce dernier dédié à la métrologie) *Ingénierie et Intégration (contrôle non-destructif, bas coût, portable) pour les demandes sociétales * Mise en place de réglementations à l'échelle nationale et européenne pour encadrer les nanomatériaux alors que les	* Acteurs académiques et industriels étrangers s'organisent déjà * Coût et entretien de la nano-caractérisation avancée * Manque de concurrence entre équipementiers * Coopération inter-équipements et choix industriels faits à l'étranger * Incertitude encore sur les structures et matériaux des futures générations technologiques, ne permettant pas d'identifier de façon précise les techniques qui seront indispensables dans 10-15 ans

techniques de caractérisation n'existent pas encore	

FICHE TRANSVERSE
« NANOLITHOGRAPHIE & NANOFABRICATION »

Problématiques à 5 ans
SUJETS EMERGENTS / RUPTURES ATTENDUES

A : Lithographie 3D et/ou haute résolution (écriture directe, nano-impression…), lithographie atomique
B : Nano-façonnage bas coût, grande surface (métamatériaux, biocapteur, marquage et contrefaçon…)
C : Nanomatériaux (ultraminces/2D) hybrides multifonctionnels
D : Auto-assemblage (nanoparticules, copolymères à blocs, systèmes bio-inspirés...) et contrôle de la dimensionnalité
E : Auto-assemblages moléculaires et nanochimie multi-composants sur substrats semi-conducteurs et isolants
F : Fabrication par transfert de matière (des molécules aux nanoparticules) et propriétés mécaniques (forces aux petites échelles)

Problématiques à 15-20 ans
VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

G : Assemblages bio-inspirés (ADN, protéines) pour structuration nanométrique/microscopique et intégration de fonctions
H : Façonnage (2D/3D) ultime à base d'atomes et de molécules individuels et caractérisations associées
I : Interfaçage de molécules et/ou assemblages moléculaires et hiérarchisation jusqu'à l'échelle mésoscopique
J : Reconfiguration dynamique d'assemblages sous stimuli (mécanique, optique, électronique)
K : Autoréparation de défauts
L : Design, fabrication et intégration de nanosystèmes multifonctionnels
M : Chimie combinatoire appliquée aux surfaces, objets et systèmes

GRILLES DE LECTURE ANR / H2020-KETS

Grille ANR : Grands Défis Sociétaux (GDS) & Aux Frontière de la Recherche (FR) : Défi de tous les Savoirs (DefSav)/OH Risque (OH)

GDS FR DefSAV OH	Gestion sobre des ressources	Energie, propre, sûre et efficace	Stimuler le renouveau industriel	Vie, santé et bien-être	Sécurité alimentaire défi démo-graphique	Mobilité et systèmes urbains durables	Société de l'information & commun.	Société innovante intégrante adaptative	Liberté et sécurité de l'Europe	FR : Défi de tous les savoirs & OH Risque
A	☒	☒	☒				☒			☒
B	☒	☒	☒				☒			☒
C	☒	☒	☒				☒			☒
D	☒		☒				☒			☒
E	☒	☒	☒				☒			☒
F	☒	☒	☒				☒			☒
G	☒	☒	☒				☒			☒ ☒/ ☒
H	☒	☒	☒				☒			
I		☒	☒				☒			☒ / ☒
J		☒	☒				☒			
K	☒	☒	☒				☒			☒ / ☒
L		☒	☒				☒			
M	☒	☒	☒				☒			☒

Grille H2020: Key Enabling Technologies (KETs)

KETs	Photonics	Nanotechnology	Biotechnology	Advanced Materials	Micro/Nano-Electronics	Advanced Manufacturing
A	☒	☒		☒	☒	☒
B	☒	☒		☒	☒	☒
C	☒	☒		☒	☒	☒
D	☒	☒	☒	☒	☒	☒
E	☒	☒			☒	☒
F	☒	☒	☒	☒	☒	☒
G	☒	☒	☒	☒	☒	☒
H	☒	☒			☒	☒
I	☒	☒	☒	☒	☒	☒
J	☒	☒	☒	☒	☒	☒
K	☒	☒	☒	☒		☒
L	☒	☒		☒		☒
M	☒	☒	☒	☒	☒	☒

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL : Xavier BOUJU (CNRS-CEMES), Frédéric CHERIOUX (CNRS-FEMTO-ST), Pascal MAILLEY (CEA-Leti), Jérôme PLAIN (Univ. Technologie de Troyes-LNIO) & Raluca TIRON (CEA-Leti)

EXEMPLE DE FOCUS :

AUTO-ASSEMBLAGE DIRIGE

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS/RUPTURES ATTENDUES

STRUCTURE : CONTROLE DE LA DIMENSIONNALITE A L'ECHELLE SUB-10 NM, ARTIFICIELLE, COMPLEXE, SANS DEFAUTS

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

COMPLEXITE ET DYNAMIQUE : ARCHITECTURES FONCTIONNELLES ET HIERARCHISEES, AUTOREPARATION, RECONFIGURATION

DESCRIPTION SUCCINCTE
Auto-assemblage dirigé

L'auto-assemblage repose sur l'intensité des interactions entre les briques de base (atomes, molécules, nanoparticules) en présence. Ces interactions entre briques et avec le support, qui est éventuellement présent, conditionnent les symétries et les structures des réseaux auto-assemblés avec des robustesses variables. Sur des surfaces, les réseaux moléculaires peuvent devenir covalents (création de liaison chimique entre briques élémentaires) et donner des objets bidimensionnels résistants. Ils sont réalisés en grande majorité sur des surfaces métalliques, et des efforts restent à faire pour généraliser cette approche à des surfaces semi-conductrices et isolantes. Qui plus est, des mélanges de constituants fonctionnels (bi- ou tri-composants) devraient permettre d'augmenter considérablement les possibilités et donc la variété des réseaux formés, et à terme de proposer également des auto-assemblages tridimensionnels, particulièrement profitables pour les problèmes de revêtement ou de protection. L'auto-assemblage dirigé doit être envisagé en vue de créer des architectures complexes et présentant *in fine* une hiérarchie structurée. Ceci trouvera des applications pour des systèmes de nano-optique et de nano-électronique.

COMMUNAUTÉS CONCERNÉES
Auto-assemblage dirigé

- ➔ Chimie : *synthèse de (macro)molécules, chimie de surface, nanomatériaux fonctionnels*
- ➔ Biochimie *: ingénierie de l'ADN, des lipides, des peptides, des protéines*
- ➔ Nano-optique : *nano-antennes, plasmonique, FRET, fluorophores, semi-conducteur organique*
- ➔ Microscopies et spectroscopies : *instrumentation, techniques couplées*
- ➔ Micro & nanotechnologies : *lithographie et façonnage, nanoélectronique et électronique moléculaire*
- ➔ Modélisation et théorie : *ab initio*, DFT, dynamique moléculaire, Monte Carlo

SWOT (périmètre : COMMUNAUTÉ FRANÇAISE)
Auto-assemblage dirigé

FORCES	FAIBLESSES
• Expertise reconnue dans les communautés scientifiques concernées et communautés nécessaires toutes présentes • Culture de l'interdisciplinarité et capacité à assembler des consortiums performants • Formation universitaire de pointe sur les nanosciences • Existence de programmes structurant de type RTB et C'Nano	• Accessibilité aux plateformes RTB • Manque de soutien au développement instrumental : microscopie, optique, technique du vide • Niveau d'intégration et de gestion de la complexité non maitrisé • Manque d'acteurs industriels pour les applications • Gestion de la recherche par projets donc vision court terme. Besoin de coordination scientifique • Cloisonnement : faible taille de la communauté bio-inspirée • Pas d'innovation bottom-up / top-down (industrie/recherche)
OPPORTUNITÉS	**MENACES**
• au-delà de microélectronique : photonique	• Intégration non maitrise

• changement de paradigme (vers une optoélectronique modulable) : couplage électronique+optique pour traitement complexe de l'information (non centralisé) • Transport, énergie, TIC	• Produits non identifiés par industriels ; Partenaires industriels important tous étrangers • Peur des nanosciences, modification du vivant • Régulation/aspects bioéthiques sur ingénierie biologique

FICHE TRANSVERSE
« NANO-OBJETS : DIMENSION < 100NM & PROPRIETES DIFFERENTES DU BULK »

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS / RUPTURES ATTENDUES

A : Ingénierie, synthèse & procédés : nouveaux objets, rationalisation & substitution des matériaux critiques, up-scaling & reproductibilité, définition/standardisation
B : Multifonctionnalité : synergies, hétérofonctionnalité, plurifonctionnalisation spatialement dirigée et/ou régiosélective
C : Modélisation : relation structure-propriété a priori (intrinsèque et d'usage) en allant vers les systèmes réels (avec défauts)
D : Maîtrise des interfaces, uniformité des comportements et propriétés sur une population de nano-objets
E : Assemblage/organisation en des structures hiérarchisées organiques, inorganiques et hybrides à complexité croissante
F : Intégration/dispersion des nano-objets dans des systèmes (textiles, composites, encres, composants, …)
G : Caractérisation fiable et reproductible des nano-objets (propriétés mécaniques, toxicologiques…)

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

H : Approche chimie verte, écoresponsable, bio-inspirée, blocs bio-ressourcés, purification
I : Architectures complexes de nano-objets
J : Intégration de composants à base de nano-objets 0D (nanoparticules), 1D (nanofils), 2D (feuillets) & 3D (nanocages …)
K : Interfaçage de nanoobjets avec le vivant et issus du vivant
L : Caractérisations multiplexées : Structure et propriétés de l'objet unique et dispersion/variabilité au sein d'une population

GRILLES DE LECTURE ANR / H2020-KETS

Grille ANR : Grands Défis Sociétaux (GDS) & Aux Frontière de la Recherche (FR) : Défi de tous les Savoirs (DefSav)/OH Risque (OH)

GDS FR DefSAV OH	Gestion sobre des ressources	Energie, propre, sûre et efficace	Stimuler le renouveau industriel	Vie, santé et bien-être	Sécurité alimentaire défi démo-graphique	Mobilité et systèmes urbains durables	Société de l'information & commun.	Société innovante intégrante adaptative	Liberté et sécurité de l'Europe	FR : Défi de tous les savoirs & OH Risque
A	☒	☒	☒	☒	☒		☒			☒
B	☒	☒	☒	☒	☒		☒			☒
C	☒	☒	☒	☒			☒			☒
D	☒	☒	☒	☒			☒			☒
E	☒	☒	☒	☒			☒			☒
F	☒	☒	☒	☒	☒		☒			☒
G	☒	☒	☒	☒	☒		☒			☒
H	☒	☒	☒	☒	☒					☒
I	☒	☒	☒	☒			☒			☒
J		☒	☒				☒			☒
K				☒	☒		☒			
L		☒	☒	☒	☒		☒			☒

Grille H2020: Key Enabling Technologies (KETs)

KETs	Photonics	Nanotechnology	Biotechnology	Advanced Materials	Micro/Nano-Electronics	Advanced Manufacturing
A	☒	☒	☒	☒	☒	☒
B	☒	☒	☒	☒	☒	☒
C	☒	☒		☒	☒	
D	☒	☒		☒	☒	☒
E	☒	☒	☒	☒	☒	☒
F	☒	☒	☒	☒	☒	☒
G	☒	☒	☒	☒	☒	☒
H			☒	☒		☒
I	☒	☒	☒	☒	☒	☒
J	☒	☒	☒	☒	☒	☒
K			☒		☒	
L	☒	☒	☒	☒	☒	☒

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL : Franck ARTZNER (CNRS-IPR), Etienne DUGUET (Univ. Bordeaux 1-ICMCB), Jean-Luc DUVAIL (Univ. Nantes-IMN), Fabienne GAUFFRE (CNRS-ISC de Rennes), Nathalie HERLIN-BOIME (CEA-Iramis)

EXEMPLE DE FOCUS
NANO-OBJETS COMPLEXES FONCTIONNELS

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS/RUPTURES ATTENDUES

CONCEPTION RAISONNEE : DU NANO-OBJET A LA FONCTION

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

ASSEMBLAGE & INTEGRATION DANS DES COMPOSANTS

DESCRIPTION SUCCINCTE : Nano-Objets Complexes Fonctionnels

Les perspectives d'applications avancées (nano-opto-électronique, imagerie et détection multimodales…) ont motivé l'élaboration de nano-objets multifonctionnels, c'est-à-dire présentant différentes fonctions d'usage. Fruit des efforts de recherche considérables fournis par les laboratoires académiques, une très grande variété de nano-objets multifonctionnels a vu le jour, avec un contrôle toujours plus fin de leur composition chimique, de leur morphologie, et de la fonctionnalisation de leur surface. Cette thématique scientifique transversale se développe dans un contexte très concurrentiel et engendre un nombre de publications en constante augmentation. On note depuis quelques années une inflexion notable vers des objets à complexité croissante.
Parmi les défis à relever, la recherche de stratégies efficaces permettant de passer du laboratoire aux applications constitue une préoccupation centrale qui peut se décliner à deux horizons. A l'échelle de 5 ans, la « conception raisonnée du nano-objet vers les fonctions désirées », qui inclut les aspects de synthèse, robustesse et passage à l'échelle industrielle des procédés, modélisation, caractérisation, substitution des matériaux critiques... Dans les 15-20 prochaines années, l'intégration de nano-objets complexes fonctionnels dans des composants et dispositifs électroniques, optiques etc…voire l'interfaçage avec le vivant, en recourant à des stratégies d'auto-assemblage dirigé et de reconfiguration sur surfaces.

COMMUNAUTES CONCERNEES : Nano-Objets Complexes Fonctionnels

- ➔ Chimistes & physiciens : *sciences et ingénierie des matériaux*
- ➔ Opticiens, électroniciens
- ➔ Théoriciens & numériciens
- ➔ Micro & nanotechnologies
- ➔ Biologie de synthèse

SWOT (périmètre : COMMUNAUTE FRANCAISE) : Nano-Objets Complexes Fonctionnels

FORCES	FAIBLESSES
• Equipes reconnues internationalement • Compétences requises toutes présentes à l'échelle nationale • Continuité scientifique grâce aux statuts des chercheurs	• Cloisonnements thématiques, faible tolérance des institutions à la porosité disciplinaire • Accès et proximité des plateformes des caractérisations • Modes de financement (projet collaboratif mais en dehors du laboratoire, contre-productif si compétences locales) • Niveaux insuffisants de financements des industriels • Faible niveau de soutien à la PI : dépôt / maintien de brevets
OPPORTUNITES	**MENACES**
• H2020 : graphène • Matériaux pour la production et le stockage d'énergie • Nombreuses applications identifiées • Santé et médicales • Multi-KETs	• Concurrence d'équipes mieux équipées dans d'autres pays : France, Japon etc… • Montée en puissance et réactivité de l'Asie : Corée, Singapour, Chine … • Prise de pouvoir des pays émergents dans les comités éditoriaux

FICHE THEMATIQUE « NANOPHOTONIQUE »

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS / RUPTURES ATTENDUES

A : Matériaux avancés (multi)fonctionnels et procédés associés pour la nanophotonique
B : Dispositifs et intégration pour les TIC
C : Nanophotonique pour la détection, la métrologie, et la manipulation de nano-objets
D : Technologies associées au moyen-IR / THz
E : Couplage phonon-photon-électron
F : Nanophotonique quantique
G : Fibres microstructurées

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

H : Matériaux et composants ultimes, contrôlés à l'échelle moléculaire et atomique : contrôle ultime spatial et spectral de nano-objets
I : Intégration des technologies THz : circuits intégrés pour le moyen-IR et le THz
J : Circuits nanophotoniques quantiques et hybrides
K : Nanophotonique agile et reconfigurable
L : Photonique organique : laser organique à injection électrique
M : Concepts alternatifs pour la nanophotonique

GRILLES DE LECTURE ANR / H2020-KETS

Grille ANR : Grands Défis Sociétaux (GDS) & Aux Frontière de la Recherche (FR) : Défi de tous les Savoirs (DefSav)/OH Risque (OH)

GDS FR DefSAV OH	Gestion sobre des ressources	Energie, propre, sûre et efficace	Stimuler le renouveau industriel	Vie, santé et bien-être	Sécurité alimentaire défi démo-graphique	Mobilité et systèmes urbains durables	Société de l'information & commun.	Société innovante intégrante adaptative	Liberté et sécurité de l'Europe	FR : Défi de tous les savoirs & OH Risque
A			☒				☒		☒	☒
B			☒				☒			☒
C			☒				☒			☒
D			☒	☒	☒		☒			☒
E							☒		☒	☒
F							☒		☒	☒
G			☒				☒			☒
H	☒	☒		☒			☒	☒		☒
I			☒		☒		☒		☒	☒
J	☒				☒		☒			☒
K	☒		☒				☒			☒
L	☒						☒			☒
M	☒	☒					☒	☒		☒

Grille H2020: Key Enabling Technologies (KETs)

KETs	Photonics	Nanotechnology	Biotechnology	Advanced Materials	Micro/Nano-Electronics	Advanced Manufacturing
A	☒	☒		☒		
B	☒				☒	
C	☒	☒	☒			
D	☒		☒		☒	
E	☒	☒			☒	
F	☒	☒				
G	☒					
H		☒		☒		
I	☒		☒		☒	
J	☒				☒	
K	☒					
L	☒					
M	☒	☒				

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL : Véronique BARDINAL (CNRS-LAAS), Frédéric BŒUF (STMicroelectronics), Jean-Marc FEDELI (CEA-Leti), Xavier LETARTRE (ECL-INL), Isabelle ROBERT (CNRS-LPN), Eric TOURNIE (Univ. Montpellier-IES), Laurent VIVIEN (CNRS-IEF)

EXEMPLE DE FOCUS

MATERIAUX AVANCES, DISPOSITIFS ET INTEGRATION POUR LES TIC

DESCRIPTION SUCCINCTE
Matériaux avancés, dispositifs et intégration pour les TIC

Les nouvelles générations de circuits photoniques pour les TIC nécessitent le développement de nouveaux matériaux basé sur une intégration monolithique ou hybride ; ainsi que de nouveaux concepts de traitement de l'information. Un des objectifs majeurs est la réduction ultime de la puissance consommée des futures générations de systèmes photoniques, en particulier la réalisation de lasers, modulateurs, récepteurs, systèmes de routage, ayant des niveaux de performance en adéquation avec les futurs protocoles de traitement du signal. Cela nécessite notamment le développement de nouveaux concepts et protocoles de rupture pour les TIC, anticipant les besoins croissants de demain, en termes de débit et sécurité d'échange.

COMMUNAUTES CONCERNEES
Matériaux avancés, dispositifs et intégration pour les TIC

- Matériaux et nano-objets pour la photonique
- Micro-nanotechnologies pour la photonique
- Intégration et packaging
- Simulation optique, multi-physique, et architecture
- Test device et test système

SWOT (périmètre : COMMUNAUTE FRANCAISE) :
Matériaux avancés, dispositifs et intégration pour les TIC

FORCES	FAIBLESSES
• Expertise forte sur le domaine du traitement de l'information optique • Bonne visibilité internationale de la communauté française • Existence de plateformes technologiques adaptées (réseau Renatech, Leti) • Présence de tous les maillons matériaux-composants-systèmes	• Absence de réseau formalisé (type GDR) des matériaux aux composants et aux systèmes • Absence de projets académiques nationaux d'envergure • Faiblesse du tissu industriel pour partenariat en packaging • Faible niveau de financement de développement de nanotechnologies complexes • Faiblesse du transfert technologique vers les PME
OPPORTUNITES	**MENACES**
• Présence de grands groupes partenaires industriels • Opportunités de financement européen à mieux exploiter	• Lourdeur des procédures de valorisation • Incertitude sur la pérennité des financements • Compétition internationale forte (USA, Japon, Chine) • Bas niveau de recrutement de chercheurs → diminution de l'impact international de la communauté à terme

FICHE THEMATIQUE
« NANOTOXICOLOGIE : SANTE ET ENVIRONNEMENT »

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS / RUPTURES ATTENDUES

A : Systèmes de génération contrôlée, stable et reproductible de nanoparticules (NPs)
B : Suivi ex situ des NPs dans un organisme/l'environnement : biodistribution, élimination, accumulation
C : Maîtrise de l'exposition ou de la contamination chronique : voies aérosol / digestive / …
D : Redéfinition des outils et modèles disponibles pour l'évaluation de la toxicité chronique et faible dose
E : Identification des paramètres et des métriques associées pour l'étude de l'impact sanitaire en fonction de la voie de contamination
F : Modèle humain : étude de postes, scenarii d'exposition
G : Caractérisation du cycle de vie des NPs, évaluation de l'efficacité des moyens de « réduction » du risque nano
H : Impact des nanoparticules au cours de leur cycle de vie

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION ET APPLICATIONS

I : Maîtrise des propriétés physico-chimiques d'intérêt des nanoparticules (aérosol, en milieu liquide,…)
J : Suivi et quantification in situ et en temps réel des NP dans un organisme/l'environnement : biodistribution, métabolisation, élimination, accumulation
K : Modèles mimant des expositions spécifiques, en tenant compte de la sensibilité des individus (âge, pathologies…)
L : Modèle humain : identification de paramètres biologiques, marqueurs d'exposition et d'effet ;
M : Impact à long terme des NPs au cours de leur cycle de vie sur l'environnement (ex : impact sur les chaines trophiques) et la santé (ex : études épidémiologiques)
N : Co-exposition à plusieurs types de nanoparticules

GRILLES DE LECTURE ANR / H2020-KETS

Grille ANR : Grands Défis Sociétaux (GDS) & Aux Frontière de la Recherche (FR) : Défi de tous les Savoirs (DefSav)/OH Risque (OH)

GDS FR DefSAV OH	Gestion sobre des ressources	Energie, propre, sûre et efficace	Stimuler le renouveau industriel	Vie, santé et bien-être	Sécurité alimentaire défi démo-graphique	Mobilité et systèmes urbains durables	Société de l'information & commun.	Société innovante intégrante adaptative	Liberté et sécurité de l'Europe	FR : Défi de tous les savoirs & OH Risque
A					☒/☒					☒
B	☒		☒	☒						☒
C	☒			☒☒/☒						☒
D					☒					☒
E	☒				☒					☒
F				☒	☒					
G	☒		☒	☒	☒					☒
H	☒			☒						
I			☒		☒					
J	☒		☒	☒	☒					☒
K				☒	☒					☒
L				☒	☒					☒
M	☒			☒	☒					☒
N				☒	☒					

Grille H2020: Key Enabling Technologies (KETs)

KETs	Photonics	Nanotechnology	Biotechnology	Advanced Materials	Micro/Nano-Electronics	Advanced Manufacturing
A		☒		☒		☒
B		☒	☒			
C		☒	☒			☒
D		☒	☒	☒		
E		☒	☒			
F		☒	☒			
G		☒		☒		☒
H		☒		☒		
I		☒		☒		☒
J		☒	☒			
K		☒	☒			
L		☒	☒			
M		☒	☒	☒		
N		☒	☒	☒		

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL : Anne VAN DER MEEREN (CEA – DSV), Anna BENCSIK (Anses), Cécile DUCROS (CEA – DRT), Charles MOTZKUS (LNE), François-Xavier OUF (IRSN)

EXEMPLE DE FOCUS

ETUDE DU COMPORTEMENT DES NANOPARTICULES DANS LE VIVANT

Problématiques à 5 ans

SUJETS EMERGENTS/RUPTURES ATTENDUES

EX SITU

Problématiques à 15-20 ans

VERROUS MAJEURS : COMPREHENSION & APPLICATIONS

IN SITU / TEMPS REEL

DESCRIPTION SUCCINCTE : Etude du comportement des NP dans le vivant

La connaissance du comportement des nanomatériaux (NM) dans le vivant et l'environnement (biodistribution, accumulation, excrétion) et notamment des caractéristiques physico-chimiques gouvernant ce comportement, est un élément essentiel lors de l'évaluation de risque. Ceci nécessite de développer et de valider des modèles d'exposition réalistes, notamment en termes de doses d'exposition, de disposer d'outils performants adaptés à la détection et à la mesure des NM dans des matrices complexes, ainsi que redéfinir les paramètres physiologiques pertinents dans l'évaluation de la toxicité des NM.

COMMUNAUTES CONCERNEES : Etude du comportement des NP dans le vivant

- toxicologues/écotoxicologues
- physico-chimistes
- chimistes
- physiologistes
- biologistes
- pharmacologues
- métrologues
- médecins du travail
- modélisateurs pour la biocinétique

SWOT (périmètre : COMMUNAUTE FRANCAISE) : Etude du comportement des NP dans le vivant

FORCES	FAIBLESSES
• Présence des équipements nécessaires • Présence d'expertises reconnues (toxicologie, biologie, normalisation, métrologie…) • Capacité de synthétiser des nanomatériaux marqués • Existence de groupes de travail : club nanométrologie, GT Anses, GT OMNT	• Manque des modélisateurs • Manque de lisibilité/cohérence de la politique française : difficulté à fédérer les différentes communautés • Manque de plateforme nationale d'exposition ; • Complexité à gérer des projets transdisciplinaires (difficulté à trouver un langage commun) • Manque de financements publics et industriels • Manque de lobbying • Manque de structuration nationale, commune entre les industriels, les chercheurs et les pouvoirs publics (malgré l'apport positif du Labex Serenade)
OPPORTUNITES	**MENACES**
• Besoin de réglementation en nanotoxicologie • Questionnement sociétal • Développement industriel nanos/analyse de risque	• Réglementation sur l'expérimentation animale • Poids de la réglementation de sécurité • Structuration et prépondérance d'autres pays européens

3-2- Description de 4 scenarii prospectifs d'évolution et d'impacts sur les marchés des nanosciences et nanotechnologies en France

Ont contribué à la conduite de ce travail de prospective
***Pilotage** : Ariel LEVENSON (CNRS, C'Nano) et Julie CARIMALO (CNRS, C'Nano)*
***Co-pilotage** : Gérard BERGINC (Thalès), Michel DE LABACHELERIE (CNRS, INSIS), Stéphane DELALANDE (PSA), Giancarlo FAINI (CNRS, INP), Olivier PEYRET (CEA), Thierry BILLON (CEA)*
***Equipe de soutien** : Vincent BOLY (ERPI, Université de Lorraine), Françoise HENRIO (OMNT), Raphaëlle JARRIGE (CNRS, DIM NanoK/ C'Nano), Philippe LAMBERT (IJL, C'Nano), Anne-Sophie SALVETAT (CBMN, C'Nano), Elodie THACHIL (CNRS, C'Nano)*
Cette étude a également bénéficié de la participation d'une centaine d'experts académiques et industriels issus d'une grande diversité d'organismes ou d'entreprises, du soutien et de l'aide de la société de conseil Futuribles, des services de valorisation de l'INP, de l'INSIS et de la DIRE du CNRS ainsi que du bureau CNRS en Chine.

Méthodologie de l'étude prospective menée dans le cadre de l'Axe 2 & 3

La méthodologie qui a été adoptée pour l'étude prospective de l'axe 2-3 de l'ARP, pilotée par le réseau C'Nano du CNRS, est une **démarche de prospective** selon une approche globale et systémique, la **méthode des scenarii,** utilisant une **approche française de prospective de l'action**, c'est-à-dire

- d'une part, elle associe professionnels de la prospective et experts, acteurs des nanosciences et technologies
- d'autre part, elle a pour objet l'élaboration de préconisations d'actions pour, parmi les futurs possibles, tendre vers celui qui est souhaitable

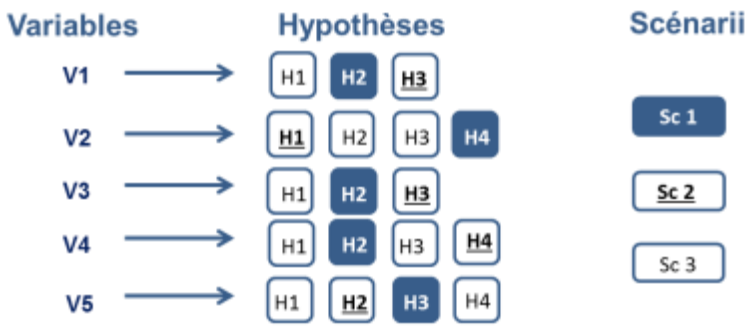


Figure 1 : Principe de la méthode prospective des scenarii
La méthode des scenarii consiste dans un premier temps à déterminer les variables, c'est-à-dire les facteurs déterminants pour le développement des nanosciences et nanotechnologies, puis élaborer des hypothèses exclusives d'évolution de ces variables et enfin établir des scenarii possibles en choisissant une hypothèse pour chaque variable.

Afin de mobiliser le plus grand nombre d'experts possible, nous avons choisi d'apporter deux variantes à la méthode classique des scenarii :

- réaliser une enquête auprès des acteurs en nanosciences et nanotechnologies.
- organiser un séminaire d'experts pour réfléchir sur les variables identifiées et contribuer à l'élaboration des scenarii. Plus d'une centaine d'acteurs des nanosciences et nanotechnologies a ainsi pu participer à l'étude, dont près de la moitié étaient issus d'entreprises ou de pôles de compétitivité.

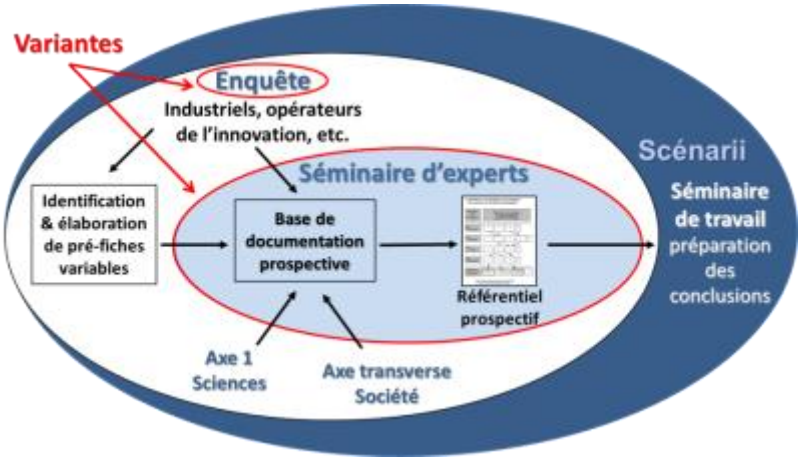


Figure 2 : approche prospective dans notre étude : méthode des scenarii associant deux variantes

Notre approche a apporté deux variantes à la méthode des scenarii afin de mobiliser un grand nombre d'experts : une enquête adressée aux acteurs en nanosciences et nanotechnologies et un séminaire d'experts les deux ayant permis de solliciter plus d'une centaine d'acteurs (voir description de la méthode dans les paragraphes suivants).

Enquête auprès des experts

L'Enquête réalisée auprès des experts avait un but qualitatif et a consisté en :

- **un questionnaire** avec un volet adressé aux industriels à travers les pôles de compétitivité, CCI, les SATT, les services de valorisation du CNRS (INP, INSIS, DIRE) et un volet adressé aux laboratoires académiques au travers des 6 centres de compétences C'Nano.
- **des interviews personnalisées** réalisées auprès de représentants d'une chambre de commerce et d'une quinzaine d'industriels français producteurs ou distributeurs de produits ou services intégrant des nanotechnologies. Ces industriels proviennent de divers secteurs tels que la construction, l'énergie, l'environnement, etc.

Les réponses à l'enquête adressée aux experts académiques et industriels ont été analysées sous la forme de statistiques descriptives. Elles ont contribué à nourrir les fiches rédigées sur les variables identifiées. Des synthèses de résultats de cette enquête sont présentées en annexe du document (Annexe, Figures 4 à 8).

Analyse de l'impact des nanosciences et nanotechnologies dans les défis sociétaux de l'ANR

Un travail préliminaire à l'identification des variables a été réalisé, consistant en une analyse de l'impact des nanosciences et nanotechnologies dans chaque Défi ANR sur les aspects technologique, économique, politique, sociétal, juridique et environnemental (voir Annexe Figure 1 : Exemple de fiche sur le défi 2 « *Energie propre, sure et efficace* » en annexe).

Analyse de l'impact des nanosciences et nanotechnologies dans la chaine de valeur industrielle et les filières industrielles stratégiques françaises

A partir des réponses obtenues dans le questionnaire adressé aux industriels, nous avons également évalué l'impact des activités en nanosciences et nanotechnologies d'un industriel sur les filières stratégiques françaises définies par le Ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique ainsi que sur la chaine de valeurs industrielles. Ce travail nous a permis de définir le type de variables à identifier et nous a ainsi conduits à définir des variables de contexte pour l'élaboration des scenarii, ces derniers étant *in fine* interfacés avec les technologies et filières intégrant des nanotechnologies (voir Annexe Figures 2,3).

Identification des variables

Trois composantes et dix variables de contexte ont été identifiés. Pour chacune des dix variables identifiées, une fiche descriptive entre 5 et 15 pages a été élaborée, présentant la structuration suivante :

- une première partie définissant les contours de la variable et les indicateurs pertinents pour décrire son évolution ;
- une partie rétrospective retraçant l'évolution de la variable sur les 10-15 dernières années ;
- une partie prospective se terminant par les hypothèses d'évolution de la variable.

Le contenu de ces fiches provient de rapports de différentes instances (OCDE, mission interministériel français, PCAST américain…) ou d'études propres dont certaines sont issues d'analyse de données du web et d'autres de données issues du bureau CNRS en Chine pour les données sur ce pays.

Des pré-fiches variables ont d'abord été réalisées par le comité opérationnel de l'axe 2-3 pour être envoyées comme base de documentation prospective aux experts pour le séminaire, à l'issue duquel elles ont été modifiées, et complétées pour réaliser les fiches variables définitives. Ces fiches sont situées en annexe du document (voir Annexe, Figure 10).

Séminaire d'experts

Le séminaire d'experts s'est déroulé sur 2 jours avec l'organisation d'ateliers de réflexion sur les variables et sur les scenarii (voir programme en annexe, Figure 9). Ce séminaire a réuni une soixantaine d'experts de différents horizons dont des d'industriels, des chercheurs académiques parmi lesquels sept issus des sciences humaines et sociales, des représentants de services de valorisation, des professionnels de la santé au travail, etc.

Elaboration des scenarii définitifs

Un séminaire de travail, réunissant l'ensemble du comité opérationnel de l'ARP, a consisté à réaliser une synthèse des différents pré-scenarii proposés par les experts, dont certains se recouvraient, pour établir les quatre finaux listés dans l'encadré suivant.

Scenario 1 : scenario tendanciel et sortie de jeu lente de la France et de l'Europe

Scenario 2 (variante du scenario 1) : scenario catastrophe : déclin rapide et brutal de la France et de l'Europe

Scenario 3 : politiques atones en France et proactivité d'industriels dans des filières intégrant des nanotechnologies

Scenario 4 : Position forte de la France et de l'Europe, co-construction et vision européennes partagées

Les pré-fiches variables et documents de travail fournis lors du séminaire d'experts et ayant servi à l'élaboration des scenarii ont été construits par le comité opérationnel de l'axe 2&3 et l'équipe de soutien sous la direction de C'Nano. Chaque scenario est décrit ci-après, la rédaction ayant été assurée par Gérard BERGINC (Thales Optronique), Julie CARIMALO (CNRS- C'Nano), Stéphane DELALANDE (PSA Peugeot Citroën), Michel DE LABACHELERIE (CNRS) et Ariel LEVENSON (CNRS- C'Nano).

SCENARIO 1 : « SCENARIO TENDANCIEL ET SORTIE DU JEU LENTE DE LA FRANCE ET DE L'EUROPE »

Brève description du scenario

Le marché des nanotechnologies connaît une croissance forte de 10 à 15% par an au niveau mondial. Cette croissance est une conséquence d'une forte adéquation entre la demande et le développement de ces nouvelles technologies, accompagné par des politiques actives de soutien à la recherche et à l'innovation aux Etats-Unis et dans certains pays asiatiques, notamment la Chine et la Corée du Sud. La recherche et la production françaises décrochent, ne bénéficiant pas d'un écosystème de développement favorable. Cette situation a pour principale origine l'immobilité relative des politiques publiques, paralysées par la crainte de controverses sociétales vis-à-vis des risques potentiels des nanotechnologies. Les industriels développent leurs produits issus des nanotechnologies en dehors de la France. A l'échelle européenne, la focalisation de la recherche à des niveaux de maturité technologique (*Technology Readiness Leve*l**,** TRL) élevés ne favorise pas les coopérations et synergies entre industriels au sein du continent.

Une demande soutenue

Depuis le début des années 2000, les nanosciences et nanotechnologies apportent de nouvelles fonctionnalités et engendrent l'émergence de nouveaux produits, solutions ou systèmes qui connaissent une forte croissance (**voir Encadré 1**).

Encadré 1 : croissance du marché des nanosciences et nanotechnologies entre 2000 et 2015[15]

L'inventaire fourni par le projet PEN (Project on Emerging Nanotechnologies) du Woodrow Wilson Institute, a recensé 1628 produits sur le marché mondial en octobre 2013 dont 440 au niveau européen. Selon le rapport interministériel français publié en 2013[14], la production mondiale de nanomatériaux a en outre été multipliée par 10 entre 2002 et 2011, passant à plus de 270 000 Tonnes en 2011. Une estimation conservatrice pour 2016 est d'environ 400 000 tonnes[2]. Selon les projections réalisées lors d'une étude menée par Lux Research et publiées dans le rapport du PCAST américain de 2014, le montant des recettes de la commercialisation de produits nanosciences et nanotechnologies prédit en Europe serait légèrement supérieur à celui des Etats-Unis en 2015, correspondant à plus de 20 billions de dollars. En France, la déclaration obligatoire sur les substances à l'état nanoparticulaire donne un indicateur, certes imparfait et limité à certains champs des nanotechnologies : 3409 déclarations en 2013, 10417 en 2014, pour 400 000 tonnes de substances produites ou importées en 2014.

De 2015 à 2030, la demande mondiale de produits et services pour lesquels les nanotechnologies apportent un potentiel d'innovation important se confirme. Cette demande croissante est d'abord liée au développement d'une consommation de masse sensible aux innovations offrant de nouvelles fonctionnalités dans les produits de grande consommation. De ce point de vue, les recherches menées dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies engendrent entre 2015 et 2030 des applications, et ce, non seulement dans des domaines « traditionnels » tels que les matériaux et l'électronique, mais également dans des secteurs plus émergents (en termes d'applications issues des nanotechnologies) comme ceux de la biologie ou de la nano-médecine. Dans un contexte de tensions sur les ressources naturelles nécessaires au fonctionnement d'une économie en croissance, les industriels peuvent répondre pour partie en limitant leurs besoins de matières grâce aux nanosciences et nanotechnologies.

[15] Voir la fiche variable « *Pôles de R&D et de production mondiaux* », Figure 9

De fait, celles-ci apparaissent de plus en plus structurantes dans le développement d'une économie verte, et ce, d'autant plus que l'usage des nanosciences et nanotechnologies dans la restauration du bon état écologique des milieux semble positif (dépollutions, etc.).

Pour répondre à cette demande mondiale de produits manufacturés et aux enjeux d'un développement durable, les industriels ont donc tendance à miser sur les nanosciences et nanotechnologies et s'appuient autant que possible sur un soutien à la recherche fondamentale comme aux développements applicatifs. Néanmoins, au cours des années 2015 à 2030, les écarts se creusent entre des régions ou des pays, soutenant massivement le développement d'un secteur des nanosciences et nanotechnologies, et d'autres, notamment en Europe, où le domaine ne fait pas l'objet d'une priorisation au sein des politiques publiques.

Une politique volontariste dans des pôles mondiaux à forte attractivité

Au premier chef, ce sont les Etats-Unis qui développent une politique de soutien aux nanosciences et nanotechnologies ambitieuse dans la lignée du plan de financement et de coordination des programmes de recherche interdisciplinaire, la *National Nanotechnology Initiative* (NNI) lancée en 2000 (**voir Encadré 2**).

Encadré 2 : l'Initiative Nationale en Nanotechnologies aux Etats-Unis

L'Initiative Nationale en Nanotechnologies américaine, la NNI, a été créée en 2000 avec pour mission d'assurer, sur du long terme, le financement de la recherche exploratoire en nanosciences et nanotechnologies, le développement d'infrastructures adaptées, la formation d'un personnel qualifié et la coopération transdisciplinaire. Aujourd'hui, une vingtaine de départements, agences et commissions indépendantes participent à ce programme parmi lesquels onze bénéficient d'un budget de R&D spécifique aux nanosciences et nanotechnologies. C'est le cas de la NSF (National Science Foundation), le NIH (National Institute of Health), le NIST (National Institue of Standards ans Technology), le DOE (Department of Energy) et le DoD (Department of Defense). Evalué tous les 3 ans, la NNI[16] propose des plans stratégiques basés sur un management par objectifs opérationnels (Program Component Areas, PCA) et bénéficie, depuis sa création, d'un appui soutenu de la Maison Blanche et du Congrès.

Les réorientations de ce programme issues de ses évaluations régulières n'entraînent pas de modifications profondes des priorités américaines et permettent une forte continuité dans la conduite de cette initiative. L'articulation entre recherche fondamentale et applications est maintenue au cours des années 2015 et 2030 et permet de structurer un secteur des nanosciences et nanotechnologies articulant fortement recherche académique et besoins industriels.

Les investissements cumulés des Etats-Unis, la qualité des recherches menées et les articulations avec les industriels en font un leader dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies. Si ce *leadership* se maintient au cours des années 2015-2030, de nouvelles puissances confirment et accentuent leur essor. C'est le cas notamment de la Chine, la Corée du Sud, la Russie, l'Inde ou l'Iran, qui avaient initié un développement important de leurs activités dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies dès le milieu des années 2000.

Ainsi, la Chine et la Corée du Sud en particulier acquièrent dans les années 2030 une position de *leaders* sur la scène internationale au même titre que les Etats-Unis. L'essor fulgurant de ces deux pays a été impulsé par une réelle stratégie gouvernementale pour les nanosciences et nanotechnologies qui sont vues comme

[16] Des informations détaillées sur ce programme Américain sont rassemblées sur le site dédié : www.nano.gov.

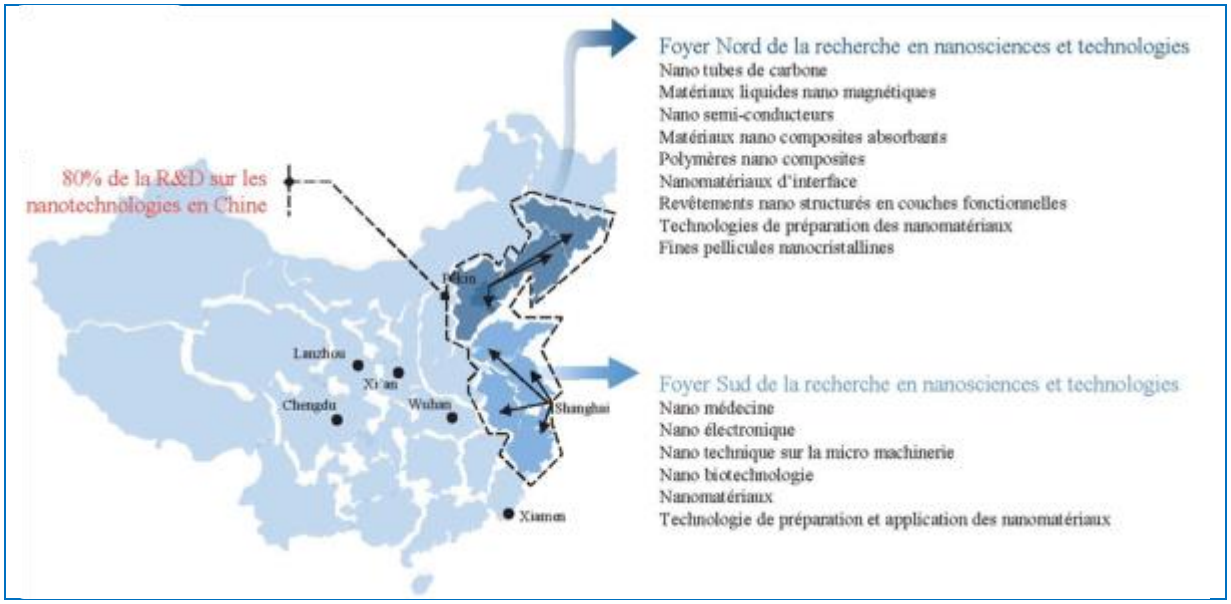
un domaine d'avenir, accompagnée de moyens financiers publics très importants. Cette stratégie couvre de façon intégrée et coordonnée les universités, les centres de R&D et les relations internationales permettant de favoriser l'industrialisation et la commercialisation de produits et technologies nanosciences et nanotechnologies issus de la recherche et de l'innovation (*techno push*).

La Chine développe un modèle d'innovation efficace qui favorise un passage rapide de la recherche aux applications (**voir Encadré 3**). Son modèle repose sur la création et le renforcement de plateformes de maturation permettant d'accélérer la mise sur le marché de produits nanosciences et nanotechnologies. Ces plateformes rassemblent dans un même lieu géographique, des centres d'enseignement et de R&D, des incubateurs et des entreprises de statuts très variés (start-up, PME, GG). Ce système permet ainsi un avantage compétitif en accélérant l'industrialisation et la commercialisation au niveau mondial de produits chinois issus des innovations et de la recherche, sur des secteurs particulièrement stratégiques pour le développement du pays, comme les matières premières, l'énergie, l'environnement et l'éco-industrie. Ces domaines de recherche et le développement dans les nanosciences et nanotechnologies concomitant de la mise en place de modèles économiques organisés autour de l'économie circulaire font de la Chine le leader des nanosciences et nanotechnologies au service du développement durable.

Encadré 3 : le modèle d'innovation chinois en nanosciences et nanotechnologies, un exemple d'attractivité programmée[17]

La recherche en nanosciences et nanotechnologies s'articule autour des quatre grandes bases de recherche, qui représentent 80% de la R&D en nanosciences et nanotechnologies en Chine. Ces bases sont localisées sur la côte Est du pays avec au Nord, le « National Center for Nanoscience and technology » à Beijing et le « China National Academy of Nanotechnology & Engineering » à Tianjin et au Sud le « Nanopolis Suzhou » à Suzhou et le « National Engineering Research Center for Nanotechnology » à Shanghai. Elles constituent de véritables plateformes de maturation, permettant d'accélérer la mise sur le marché de produits nanosciences et nanotechnologies issus de la recherche, en rassemblant dans un même lieu géographique, structures d'enseignement, centres de R&D, incubateurs et entreprises de tout type. Dans le foyer Nord, la recherche est principalement axée sur les nanomatériaux (nanotubes de carbone, matériaux liquides nano-magnétiques, semi-conducteurs nano, matériaux nano-composites absorbants, polymères nano-composites, nanomatériaux d'interface, etc.,) tandis qu'une recherche plus spécifique sur la nanobiomédecine est menée dans le foyer Sud.

[17] Données fournies par le bureau du CNRS en Chine



La Chine a également consolidé et augmenté le nombre de ses interactions et d'échanges de scientifiques avec l'étranger, plus particulièrement avec les USA, lui permettant d'acquérir de nouveaux savoir-faire utiles pour le développement de centres R&D extrêmement performants et ainsi accélérer la montée en puissance du pays en termes de production et de consommation « nano ». En 2030, la Chine est donc un pôle de R&D et de production en nanosciences et nanotechnologies extrêmement dynamique proposant un environnement propice au développement de l'innovation et des start-ups, devenu attractif pour les industriels et chercheurs du monde entier.

Comme la Chine, la Corée du Sud mène également une politique volontariste pour le développement d'une industrie forte et performante en utilisant les nouvelles technologies que sont les nanosciences et nanotechnologies avec une spécialisation forte dans l'approche système dans les domaines des TIC, des biotechnologies, de l'énergie et le transport. Le soutien au transfert technologique et à la commercialisation de produits nanosciences et nanotechnologies est une priorité pour le pays qui a développé pour ce faire un programme robuste. La politique de collaboration internationale que la Corée a entretenu lui a permis d'acquérir des compétences élevées dans des domaines technologiques de pointe, la hissant dans les premiers rangs mondiaux aux côtés de la Chine et des USA.
Un autre pays attire une attention particulière : il s'agit de l'Iran, qui après une longue période de développement en autarcie pour des raisons géopolitiques, a développé une politique d'ouverture à l'international lui permettant, tout en conservant une autonomie vis-à-vis des pays leaders, de renforcer ses atouts en R&D dans les nanosciences et nanotechnologies, notamment dans les champs de la nanométrologie et de l'instrumentation. L'Iran a ainsi pu monter discrètement mais sûrement pour atteindre un rang très honorable à l'échelle internationale dans la course aux nanosciences et nanotechnologies, dépassant largement nombre de puissances des années 2010 en termes de marché, et jouant un rôle significatif dans les instances de normalisation.

Plus généralement, on voit apparaître un contexte international multipolaire avec l'émergence ou la consolidation de pôles forts et dynamiques dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies comme Israël, Singapour, Taiwan, l'Inde, la Russie, la Malaisie, ou d'autres.

Un manque de priorisation des nanosciences et nanotechnologies et de coordination en France

Dans ce contexte international extrêmement dynamique, la politique de recherche française a revêtu un caractère atone vis-à-vis des nanosciences et nanotechnologies, rompant ainsi avec les démarches proactives et coordonnées pourtant initiées au début des années 2000. Depuis, les nanosciences et nanotechnologies ne sont plus reconnues comme une solution incontournable pour le développement scientifique, technologique et industriel, du pays et leur soutien ne bénéficie de ce fait plus d'une action coordonnée.

Ceci s'explique en partie par la crainte, pour les décideurs politiques, de l'émergence de controverses sociétales associées aux nanosciences et nanotechnologies. Si l'attrait de la nouveauté favorise un engouement pour certaines applications des nanosciences et nanotechnologies, comme les smartphones, d'autres applications peuvent entraîner des résistances vis-à-vis des nanosciences et nanotechnologies dans leur globalité. Ainsi, l'incorporation de nanomatériaux dans les cosmétiques suscite de fortes divergences d'opinions bien relayées par les médias. De même, le concours apporté par les nanosciences et nanotechnologies au développement de la biométrie est mal perçu. Les critiques portent sur deux axes, d'une part les conséquences pour les libertés individuelles (traçage des individus), et d'autre part surtout sur les risques pour la santé des consommateurs. Inquiète d'un possible effet « OGM », la puissance publique n'ose ainsi pas prendre l'initiative d'un engagement majeur dans la recherche et le développement industriel sur les nanosciences et nanotechnologies.

Cette atonie se caractérise par une absence de ciblage spécifique « nano » dans les appels à projets lancés par la France. Alors que l'Europe accompagne les appels par défis sociétaux de la notion de technologies clefs génériques (*Key Enabling Technologies*, KET) dont font partie les nanosciences et nanotechnologies, la France continue à privilégier le soutien de projets scientifiques répondant à des défis sociétaux génériques sans reconnaître l'effet levier essentiel apporté à beaucoup d'entre eux par les nanosciences et nanotechnologies (et le gain apporté par une structuration sur ce domaine transversal).

La dynamique interdisciplinaire apportée par le sentiment d'appartenance à la communauté nanosciences et nanotechnologies s'est ainsi évanouie et les effets bénéfiques de la diffusivité des nanosciences et nanotechnologies, au travers des disciplines scientifiques et des filières industrielles, se raréfient. Le développement de formations interdisciplinaires s'essouffle et le cloisonnement disciplinaire entre les différentes composantes des nanosciences et nanotechnologies s'accélère, diminuant l'impact du domaine et limitant fortement les gains associés à un développement transversal. La formation « nano » se limite souvent à un module ou une option dans une formation plus généraliste. La fertilisation croisée académie-industrie et industrie-industrie (taille d'entreprises, chaîne de valeur industrielle et filières industrielles) est mise à mal. Certaines composantes scientifiques et industrielles françaises tirent individuellement leur épingle du jeu, mais, sans coordination, l'écosystème français n'est plus propice au développement d'innovations de rupture et de nouvelles filières autour des nanosciences et nanotechnologies.

Du fait de l'absence de coordination et d'affichage, les nanosciences et nanotechnologies deviennent une nébuleuse, les échanges sciences-société se raréfient. Afin d'éviter les controverses sociétales, on assiste à

une poursuite de l'encadrement des nanosciences et nanotechnologies, avec une multiplication de normes sectorielles, sur des modalités similaires que celle de la déclaration de substances à l'état nanoparticulaire mise en place en 2013. Néanmoins, le manque de formation adaptée en toxicologie, éco-toxicologie, métrologie et caractérisation multifonctionnelle, ne permet pas une bonne évaluation des risques sanitaires et environnementaux. De telles mesures, non accompagnées d'une politique volontariste de soutien au développement des nanosciences et nanotechnologies, apparaissent trop contraignantes et incitent nombre d'industriels soit à contourner l'approche « nano » en perdant de la compétitivité, soit à la développer en dehors de la France dans des pôles internationaux attractifs.

Cet affaiblissement des nanosciences et nanotechnologies en France s'accompagne d'une position Européenne ne favorisant pas une structuration efficace de la recherche et des acteurs industriels.

Une Europe en perte de vitesse

En lançant en 2014 le plan Horizon 2020, l'Europe a souhaité corriger le déficit de transfert technologique vers l'industrie en ciblant prioritairement le soutien aux projets présentant un niveau de maturité technologique (*Technology Readiness Level*, TRL) élevé. Les résultats du plan sont in fine mitigés ou difficiles à évaluer, mais l'interprétation qui l'emporte alors met en avant le besoin de continuer la démarche pour en apprécier les bénéfices. La tendance se poursuit donc au cours des années 2020.

La recherche tente alors de se positionner et se structurer à ces niveaux de TRL, mais la compétition industrielle inhérente aux TRL élevés limite *in fine* la capacité des acteurs à établir des collaborations les uns avec les autres, les dynamiques se tarissent, les accords de consortia sont longs à établir et les innovations de ruptures sortent du périmètre des projets européens du fait d'un découplage entre sa base amont, mal exploitée, et sa recherche industrielle.

L'Europe ne réussit pas non plus à prioriser et utiliser les atouts de ses différents pays membres. En favorisant une politique d'accord minimal, sans reconnaitre les forces et faiblesses de chaque pays membre dans les différents domaines scientifiques et filières industrielles concernés par les nanosciences et nanotechnologies, elle a participé à son déclin progressif. Les différents gouvernements européens n'ont ainsi pas su se coordonner pour mener une politique volontariste et efficace pour soutenir une R&D puissante dans les nanosciences et nanotechnologies. Certains, comme l'Allemagne, jouent avec un certain succès une carte nationale et tissent des alliances stratégiques leur permettant de limiter les conséquences de l'atonie européenne. Dès lors, même dans un contexte international de croissance du marché des nanosciences et nanotechnologies, la France et l'Europe voient leurs activités ralenties dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies. Ainsi, la courbe de l'emploi en nanosciences et nanotechnologies en France et en Europe est affectée et ne fait que suivre la tendance de la courbe de l'emploi total. Dans ce contexte, les pays européens souffrent de la fuite des cerveaux et de la délocalisation de certaines filières industrielles qui profitent aux pôles asiatiques, en particulier à la Chine qui bénéficie, quant à elle, d'un *brain gain*.

Une sortie de jeu lente de la France et de l'Europe

Dans un contexte de raccourcissement du temps de mise sur le marché de produits nanosciences et nanotechnologies, d'accélération de la structuration de pôles internationaux portés par une politique

volontariste de nouvelles puissances émergentes, et de manque d'une politique proactive et de coordination efficace pour le développement des nanosciences et nanotechnologies, on aboutit à une perte de compétitivité scientifique, technologique et industrielle française et européenne.

In fine, on assiste à une sortie du jeu lente de la France et de l'Europe dans la course aux nanosciences et nanotechnologies, tant en recherche qu'en production.

Les technologies émergentes et filières industrielles utilisant depuis plus récemment les nanosciences et nanotechnologies sont les premières impactées, l'écosystème n'étant pas propice aux innovations de rupture telles que les emballages et textiles intelligents, les organes artificiels, les thérapies ciblées, les nanosciences et nanotechnologies pour la détection de particules fines dans l'air ou la dépollution de l'air, etc. (Figure 1).

Dans un second temps, les filières à forte tradition nanosciences et nanotechnologies sont également touchées, la filière des technologies de l'information et de la communication (TIC) se ressource ailleurs qu'en Europe. Le déclin des filières françaises et européennes dans les domaines technologies de l'information et de la communication et des nanomatériaux entraine la perte de compétitivité lente de filières à forte inertie, telles que l'aéronautique et l'automobile (matériaux composites, batterie, parebrises multifonctions, revêtements, capteurs). Les filières intégratrices, telles que le militaire, se trouvent mises en relation de dépendance, le coût de la sécurité augmente sensiblement et l'autonomie de souveraineté du pays est remise en cause.

En contraste à ce déclin français et européen, on assiste à une prédominance de pôles de recherche et de production extra-européens avec un binôme Asie- USA au leadership fort, accompagné par quelques acteurs majeurs (Corée du Sud…).

Récapitulatif des points clefs constitutifs du scenario 1

- Une forte demande en nanosciences et nanotechnologies au niveau mondial ;
- Des politiques volontaristes de soutien à la recherche et à l'innovation dans de nombreux pays ;
- Crainte des décideurs politiques français, notamment d'une controverse sociétale vis-à-vis des nanosciences et nanotechnologies du fait des risques potentiels ;
- Pas d'engagement coordonné de la recherche publique sur les nanosciences et nanotechnologies, pas de politique de soutien ciblée ;
- Peu d'incitation aux coopérations entre acteurs au niveau européen ;
- Les industriels délaissent le champ des nanosciences et nanotechnologies en France et plus généralement en Europe, mais le développent ailleurs.

➢ ***En 2030, la recherche et l'industrie des nanosciences et nanotechnologies est clairement l'apanage des Etats-Unis, de la Chine et de la Corée.***

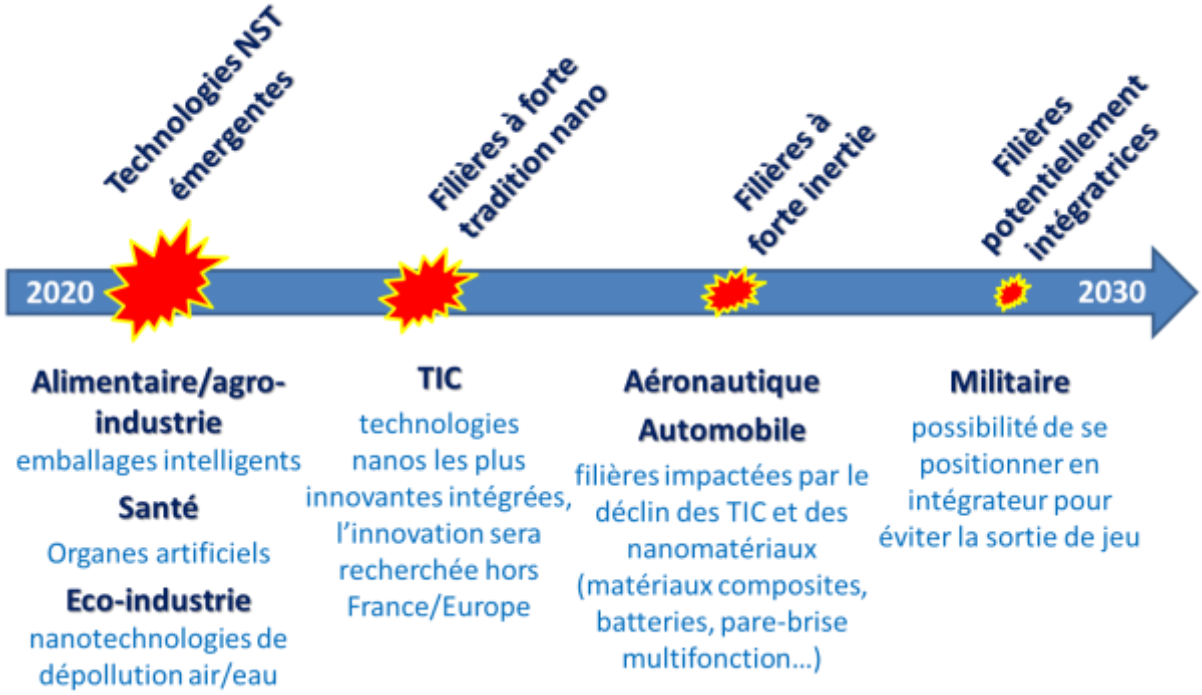


Figure 1 : Déploiement temporel de l'impact du scénario tendanciel sur quelques exemples de filières et technologies nanosciences et nanotechnologies.

SCENARIO 2 (VARIANTE DU SCENARIO 1) : « SCENARIO CATASTROPHE : DECLIN RAPIDE ET BRUTAL DE LA FRANCE ET DE L'EUROPE »

Ce scénario est une variante du scénario 1, mais, dans celui-ci, les freins politiques mis dans développement des nanosciences et nanotechnologies accélèrent le déclin des recherches sur les nanosciences et nanotechnologies, de la production et de la diffusion des nanosciences et nanotechnologies en France.

Depuis la fin des années 1980, la société française est confrontée à un certain nombre de crises et scandales, divers et variés, mettant en jeu des procédés ou avancées scientifiques et technologiques (sang contaminé, amiante, hormones de croissance, vache folle, poulet à la dioxine, prothèses PIP, etc.). Suite à ces événements, une grande partie de la population développe une méfiance vis-à-vis des sciences et des nouvelles technologies, y compris les nanosciences et nanotechnologies qui font l'objet de controverses malgré l'absence de crise sanitaire avérée. Sensibles à ce contexte et aux risques potentiels sur la santé et l'environnement, les élus se gardent d'afficher les nanosciences et nanotechnologies comme priorité nationale. Le soutien financier à ces nouvelles technologies se retrouve ainsi réduit.

Pour éviter de possibles controverses et réactions sociétales exacerbées et des risques potentiels et dans le but d'apaiser la sensibilité sociétale, les politiques français procèdent, dès les années 2010, à un durcissement de la réglementation vis-à-vis des nanosciences et nanotechnologies. Ceci se traduit par un passage à une réglementation globale concernant toutes les nanosciences et nanotechnologies par secteurs d'activités (alimentaire, cosmétique, textile, TIC, etc.) et/ou famille de nanomatériaux (tels que les nanotubes de carbone, nanoAg, $Ti0_2$, etc.), introduisant un amalgame. Cette situation paradoxale dans laquelle les nanosciences et nanotechnologies sont identifiées comme un ensemble pertinent du point de vue légal sans bénéficier d'une reconnaissance publique au niveau scientifique, entrave, et surtout décourage, une recherche responsable à même d'évaluer les bénéfices et risques de ces nouvelles technologies.
La concordance d'une mauvaise perception des bénéfices des nanosciences et nanotechnologies, de controverses ou suspicions sociétales latentes et du durcissement réglementaire, incite les industriels à anticiper un boycott de leur marché et leur déclin en France, avec une accélération de la réaction en chaîne décrite dans le scénario 1. Les industriels ayant récemment intégré les nanosciences et nanotechnologies dans leurs activités, dans le but de développer de nouveaux produits innovants et concurrentiels, abandonnent rapidement la filière. De leur côté, les industriels pour lesquels les nanosciences et nanotechnologies constituent le cœur de leurs activités de R&D et de leur marché (filières à forte tradition « nano ») délocalisent leurs filières dans des pays attractifs et proactifs dans le développement des nanosciences et nanotechnologies. Le manque d'investissements privés dans les nanosciences et nanotechnologies affecte rapidement le dynamisme de l'ensemble du secteur, y compris de la recherche.

Ainsi, la France se retrouve dès le début des années 2020, démunie d'une recherche d'une ampleur concurrentielle dans les nanosciences et nanotechnologies, et de produits « nano » sur le marché.

SCENARIO 3 : POLITIQUES ATONES EN FRANCE ET PROACTIVITE D'INDUSTRIELS DANS DES FILIERES INTEGRANT DES NANOTECHNOLOGIES

Brève description du scenario

Alors que des pôles mondiaux se consolident et amplifient leur attractivité en nanosciences et nanotechnologies, la France n'engage aucune politique proactive dans les nanosciences et nanotechnologies. Ces nouvelles technologies n'étant pas identifiées comme un ensemble, les efforts pour les promouvoir n'étant pas coordonnés, la communauté scientifique et technologique française se déstructure et la source d'échanges interdisciplinaires, moteurs du renouveau des nanosciences et nanotechnologies, se tarit. Les scientifiques et industriels se tournent dans un premier temps vers l'Europe, mais la politique de soutien ciblée sur les niveaux de maturité technologique élevés rend la co-création des savoirs difficile et conforte la politique des grands groupes centrée sur l'innovation incrémentale, pour laquelle les solutions « nano » peuvent être en forte concurrence avec des solutions moins onéreuses. Poussés par une demande du marché élevée au niveau international, et par la maîtrise accrue des nanotechnologies, laquelle permet une évaluation du rapport bénéfices/risques en phase avec les attentes sociétales, certains grands groupes (GG) décident de prendre en main et d'assurer la constitution de filières autonomes. Pour ce faire, ils mobilisent de façon proactive les acteurs des différents maillons de la chaîne de valeur industrielle, les équipes de la recherche publique, les start-ups, les PMEs, etc. Tout est alors organisé pour optimiser l'efficacité, cependant sur des filières ciblées : formations ad-hoc, plateformes de maturation, réactivité technologique, souplesse législative, etc**.** Ne trouvant pas les conditions du développement d'un tel écosystème en France et très difficilement en Europe, ces grands groupes proactifs appuient la filière dans les écosystèmes technologiques et économiques dynamiques et accueillants que sont devenus certains pays asiatiques. Dans un contexte mondial où les nanosciences et nanotechnologies sont un des moteurs de la croissance et de l'emploi, la France se trouve marginalisée et décroche aussi bien sur le plan scientifique et technologique, qu'industriel.

Un écosystème français non propice au développement des nanosciences et nanotechnologies

Dans les années 2020-2030, la France poursuit une politique de financements sur projets avec des budgets alloués aux nanosciences et nanotechnologies relativement constants par rapport à la décennie précédente. Cependant, les apports spécifiques des nanosciences et nanotechnologies au niveau scientifique et industriel ne sont que trop partiellement identifiés et reconnus. De plus, leur caractère diffusif (**voir Encadré 1**) est généralement mal identifié. Cette absence de priorisation des nanosciences et nanotechnologies va de pair avec l'absence de mise en place d'une stratégie et d'une coordination des ministères concernés par ces nouvelles technologies, et plus généralement de l'action publique dans le domaine.

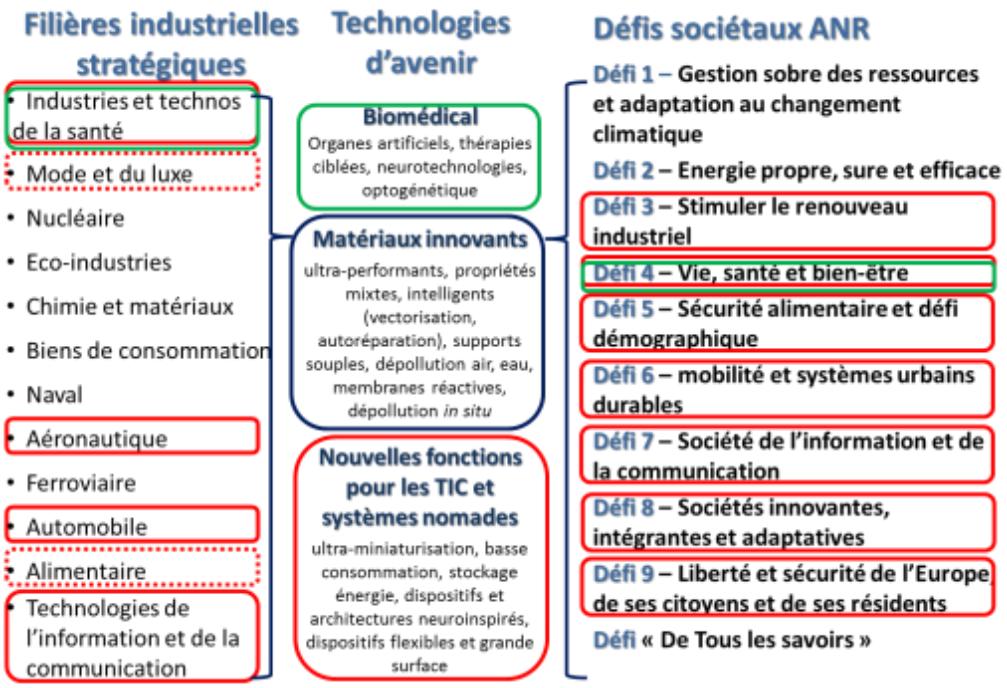
Ce contexte ne favorise pas la création de nouvelles dynamiques interdisciplinaires assurant la vitalité du domaine et la communauté scientifique perd motivation et moyens pour poursuivre ses efforts de structuration autour des nanosciences et nanotechnologies. Ainsi, les échanges entre disciplines, essentiels

au développement des nouvelles technologies, s'atténuent progressivement, entravant l'innovation de rupture. Ceci aboutit à une compétitivité scientifique affaiblie, à l'absence de création de nouvelles filières, et donc l'affaiblissement de la création de valeur en France.

Dans ce contexte, la plupart des grands groupes industriels amplifient leur politique tournée vers l'innovation incrémentale, parfois impulsée dans les années 2000 et valorisée par le *marketing*.

Encadré 1 : Diffusivité des nanosciences et nanotechnologies au sein des filières industrielles stratégiques[18], des technologies d'avenir et des défis de l'ANR en 2014

Trois grands groupes de technologies d'avenir impliquant les nanosciences et nanotechnologies peuvent être identifiés : le biomédical (encadré vert), les matériaux innovants (encadré bleu) et les nouvelles fonctions pour les TIC (encadré rouge). Chacune de ces technologies peut être reliée à la fois à au moins une des filières industrielles stratégiques définies par le Ministère de l'Industrie et un des grands défis sociétaux identifiés dans l'agenda stratégique « France Europe 2020 », et se retrouvant dans la programmation de l'ANR depuis 2014. Ce schéma met en évidence le caractère diffusif des nanosciences et nanotechnologies au sein des filières industrielles stratégiques, des défis sociétaux et des technologies d'avenir.



Dans cet écosystème apathique, les marchés associés aux technologies ou filières « nano » émergentes, tels que la nano-médecine (vectorisation, nouvelles approches de séquençage, organes artificiels, etc.), les membranes pour la dépollution de l'air et de l'eau, les nano-dispositifs pour le stockage et l'économie d'énergie, sont perdus par l'industrie nationale. Nombre d'acteurs industriels cherchent des solutions alternatives tout en évitant l'affichage « nano », lequel ajoute des contraintes règlementaires supplémentaires, toutefois de fait relativement peu contraignantes, à leurs activités.

[18] http://www.ile-de-france.gouv.fr/L-action-de-l-Etat/Economie/Emploi-Entreprise-Consommation/Filieres-industrielles

Une structuration des nanosciences et nanotechnologies dans certaines filières industrielles par de grands groupes proactifs

En réaction, certains grands groupes industriels (GG), qui voient un avantage compétitif dans l'utilisation des nanosciences et nanotechnologies, mènent une action proactive dans le but de maintenir tous les maillons de la chaine d'innovation dans leur secteur d'activités. Ainsi, ils créent et renforcent des partenariats privilégiés avec des laboratoires académiques développant des technologies « nano », soutiennent des PME et start-up innovantes et dynamiques et investissent dans la création de formations professionnelles ou continues « nano » adaptées à leurs besoins.

Cette proactivité permet une réelle structuration des acteurs dans les filières industrielles concernées. C'est le cas notamment du secteur des TIC pour lequel les nanosciences et nanotechnologies font de fait partie intégrante de la *roadmap* (à terme ou en court) depuis l'existence de la loi de Moore (1965). Dans le domaine de la défense, les efforts sont motivés par l'accès aux nouvelles fonctionnalités apportées par les nanosciences et nanotechnologies, tels que des dispositifs de détection et de protection plus performants, qui revêtent un rôle stratégique majeur.

Encadré 2 : Les politiques de financement de la R&D en nanosciences et nanotechnologies en Europe

Dans son nouveau programme Horizon 2020 (H2020) lancé en 2014, la Commission Européenne (CE) met l'accent sur les retombées économiques et sociétales de la recherche, à travers la définition de trois nouvelles priorités. L'objectif est dorénavant de résoudre le problème de la « vallée de la mort », qui sépare la production de connaissances de la commercialisation. Les projets de recherche amont apparaissent donc comme une priorité plus secondaire.

Dans H2020, les nanosciences et nanotechnologies apparaissent au sein d'un AAP ciblant plus spécifiquement les nanomatériaux (NMP) et au niveau des technologies clefs génériques (KET) de l'axe « Primauté industrielle ». Ces AAP concernent donc des projets de recherche avec un niveau de maturité technologique élevé, allant de la validation de la technologie en environnement réel (TRL5) à la démonstration du système à l'échelle prototype en environnement opérationnel (TRL7).

Pour permettre la structuration de ces filières, les industriels se tournent vers l'Europe dont les appels à projets continuent à identifier les nanosciences et nanotechnologies comme des technologies génériques clefs (*Key Enabling Technologies,* KET). Ainsi, l'aéronautique et le transport ferroviaire sont reconnus comme des atouts économiques européens et des secteurs dans lesquels la compétitivité à l'échelle mondiale nécessite l'inclusion de technologies de pointe (aussi bien en ce qui concerne l'utilisation de matériaux plus légers et résistants ou encore l'économie d'énergie) et trouvent un soutien important à l'échelle européenne. Toutefois, les coopérations et alliances inter-industrielles d'une part et entre industriels et laboratoires académiques d'autre part ne sont pas facilitées du fait d'une politique de financement privilégiant des projets présentant une maturation technologique très élevée.

A ce stade, la concurrence entre industriels prime et la co-création des savoirs et des valeurs s'avère défavorisée (**voir Encadré 2**). Ainsi nombre d'industriels ne trouvent pas de solution dans les dispositifs européens.

Une délocalisation des industriels vers des pays hautement dynamiques et attractifs

La structuration des filières « nano » par les grands groupes industriels est rendue possible en optimisant les interactions entre acteurs et en cherchant une plus grande réactivité de l'écosystème. Ceci les pousse à s'orienter vers des pays attractifs au développement des nanosciences et nanotechnologies, principalement en Asie.

Encadré 3 : Essor fulgurant de l'impact scientifique et de la valorisation des pays asiatiques

Alors que les Etats-Unis, l'Allemagne et la France ont multiplié leur nombre de publications en nanosciences et nanotechnologies environ par 4 entre 2001 et 2013, l'Inde et la Chine par exemple l'ont multiplié respectivement par 20 et 17 pendant la même période (voir fiche variable « Pôles de R&D et de production mondiaux »). En termes de facteur d'impact h la tendance du leadership des Etats-Unis s'est fortement resserrée, avec une montée en puissance de la Chine devant l'Allemagne, la France et le Japon, pendant la même période. Enfin, en termes de dépôt de brevets, la Chine est passée au 3ème rang mondial derrière les Etats-Unis et le Japon en 2012.

Dans les années 2000-2010, les pays asiatiques ont développé une dynamique extrêmement importante dans les nanosciences et nanotechnologies en termes de nombre de brevets et de publications scientifiques et du facteur d'impact h des publications (**voir Encadré 3**). Entre 2020 et 2030, cet essor fulgurant de l'Asie s'est confirmé. Le manque de priorisation et de structuration des nanosciences et nanotechnologies en France a favorisé et accentué l'écart avec des pôles asiatiques qui ont vu l'arrivée d'industriels français sur leur territoire s'accroître.

En effet, des pays comme la Chine, la Corée, Taiwan ou Singapour ont développé des universités de très haute qualité, offrant des conditions de travail en termes de moyens matériels, humains et financiers très attractives. La Chine, en particulier, a renforcé sa stratégie de développement au travers de dispositifs incitatifs en matière d'investissement et de fiscalité, pour créer des effets leviers sur l'accès au marché, et au travers de la mise en place de clusters d'excellence industrielle en recherche et développement, et de plateformes de maturation technologique.

Le mécanisme à l'œuvre dans la structuration des filières basées sur les nanotechnologies par les grands groupes hors d'Europe prend des formes multiples. Il débute par des implantations directes ou par la création de laboratoires communs avec des acteurs académiques dans un environnement propice au développement des nanosciences et nanotechnologies (cf. les tendances actuellement en œuvre, par exemple à Singapour). Ceci permet aux industriels de débuter une implantation locale, de prospecter les futurs marchés, de bénéficier d'un effet de leviers vers l'innovation technologique. Ces actions induisant des transferts scientifiques et technologiques avec les laboratoires locaux, et progressivement les industriels locaux (**voir Encadré 4**).

Un déclin abrupt du marché et des emplois français dans les nanosciences et nanotechnologies, une Europe incapable de faire émerger de nouvelles filières

A terme, ce processus mêlant apathie politique, manque de volonté d'identifier et de promouvoir les approches génériques en nanosciences et nanotechnologies, et la proactivité de certains grands groupes, déstabilise l'écosystème français en nanosciences et nanotechnologies, déstructure la communauté scientifique et technologique et conduit à une perte des compétences et savoir-faire « nano ». Si certaines filières se trouvent sauvées voire consolidées en Europe, les effets de la délocalisation de larges pans industriels et des compétences académiques aboutissent à un déclin sévère des marchés et des emplois

associés à nanosciences et nanotechnologies en France. Plus largement, ce scenario conduit à une perte de compétitivité scientifique et industrielle de la France et ce alors même que la maitrise grandissante des nanotechnologies, de leurs atouts et risques a mis un terme débats sociétaux *génériques*. La demande mondiale de production et de compétences associées aux nanotechnologies s'accroit : la courbe de l'emploi en nanosciences et nanotechnologies dans d'autres pôles mondiaux que l'Europe et surtout la France présente une croissance plus rapide que l'emploi global. *A contrario,* le marché français en nanosciences et nanotechnologies est en faible croissance et le volume de l'emploi associé stagne.

De son côté, bien qu'elle soutienne certaines filières pour des raisons géopolitiques ou du fait de savoir-faire européen historique, l'Europe n'arrive pas à promouvoir l'émergence de nouvelles filières.

In fine, ce scenario aboutit à la disparition de pôles forts de recherche et développement et de production sur le territoire français, et à une régression des pôles européens en nanosciences et nanotechnologies : la scène est dominée par l'émergence de nombreux pôles asiatiques présentant un écosystème de recherche développement et innovation extrêmement dynamique et attractif pour les industriels et chercheurs français.

Récapitulatif des points clefs du scenario 3

- Vision politique atone en France ;
- Proactivité de certains grands groupes pour garantir l'existence de la chaine d'innovation dans des filières données en dehors de la France ;
- Certains industriels se tournent vers l'Europe pour structurer une ou plusieurs filières
- Déclin total du marché et des emplois français ;
- Pas de création de nouvelles filières NST en France et en Europe ;
- Des industriels se tournent vers des pays hors Europe où l'environnement est attractif et permissif ;
- Déclin progressif du marché et des emplois européens en NST.

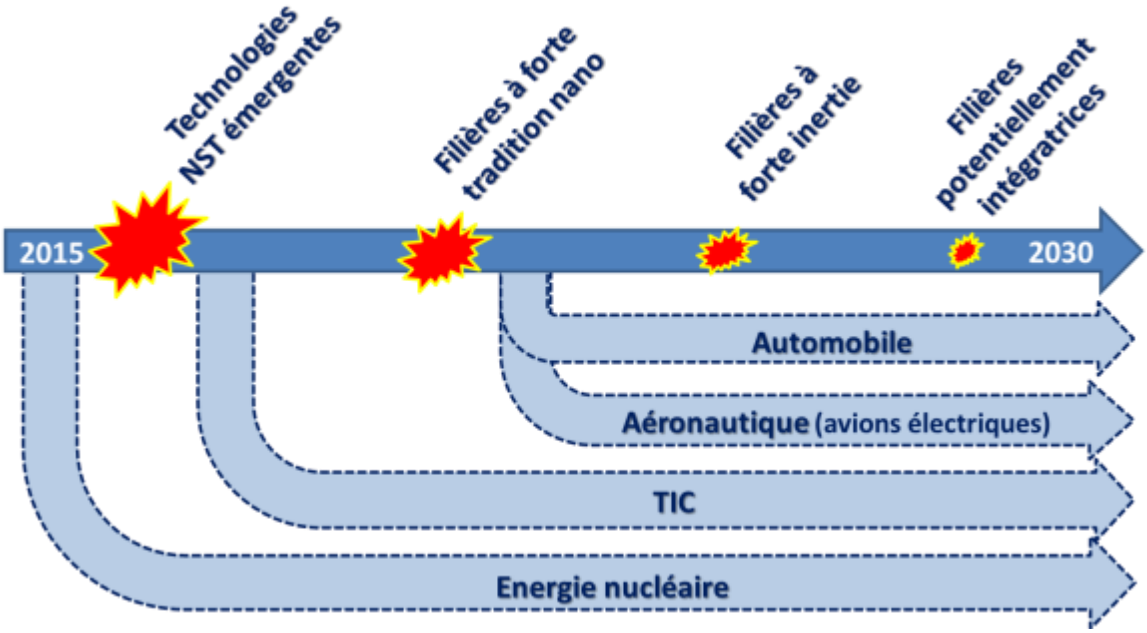


Figure 1 : Quelques exemples de filières industrielles utilisant des NST pouvant être structurées par les grands groupes.

SCENARIO 4 : « POSITION FORTE DE LA FRANCE ET DE L'EUROPE, CO-CONSTRUCTION ET VISION EUROPEENNES PARTAGEES »

Brève description du scenario

Constatant le développement important des nanosciences et nanotechnologies, considérant que celles-ci sont porteuses d'un potentiel d'innovation propre à développer la production industrielle française, y compris dans un contexte de transition écologique, une politique ambitieuse de soutien à l'innovation est mise en place. Axée sur la construction d'un écosystème associant recherche publique et industrie autour de collaborations ciblant tant la recherche fondamentale que la création d'un continuum amont-aval, cette politique est matérialisée par un plan national en nanosciences et nanotechnologies. Elle est largement soutenue par les différents acteurs.

Les nanosciences et nanotechnologies sont dès lors porteuses d'un dynamisme économique qui se traduit par une forte création d'emplois et sont largement soutenues par la société. La stratégie française influence les politiques européennes et permet de construire des collaborations avec les autres pôles mondiaux de R&D et de production dans un contexte de forte demande pour les innovations et produits issus des nanosciences et nanotechnologies.

Une proactivité de la France avec mise en place d'un plan national en nanosciences et nanotechnologies

Les nanosciences et nanotechnologies apportent de nouvelles fonctionnalités et permettent l'émergence de nouveaux produits, solutions ou systèmes qui connaissent une croissance forte (**voir Encadré 1**). Dans ce contexte, la France se dote d'une politique ambitieuse pour promouvoir l'innovation, le développement et l'investissement responsables des nanosciences et nanotechnologies. La politique proactive de la France est fondée sur des anticipations partagées par les acteurs politiques et économiques sur les perspectives de développement des nanosciences et nanotechnologies.

Encadré 1 : exemples de domaines d'application des nanosciences et nanotechnologies en 2015 et projection NED japonais à l'horizon 2030[19]

On citera quelques exemples d'applications.
Dans les produits manufacturés, les matériaux intégrant des « nanos » (caoutchoucs, plastiques, composites, latex, etc.) pour l'amélioration des propriétés mécaniques (modules, résistance à la traction, aux chocs, au déchirement,…), de la perméabilité, etc. peuvent être destinés au secteur de l'automobile, de l'aéronautique ou encore du papier ou du

Les hypothèses sur lesquelles se fonde cette politique sont essentiellement que les nanosciences et nanotechnologies 1/ ont un caractère générique et diffusible à de nombreux domaines scientifiques, technologiques et aux filières industrielles associées 2 / recèlent un potentiel d'innovation favorable au développement industriel notamment parce qu'elles peuvent répondre à certaines attentes des consommateurs 3 / sont porteuses d'un potentiel important d'économie de ressources naturelles et de réduction des pollutions.

[19] Fiche variable « *Pôles de R&D et de production mondiaux* », Figure 9.

packaging.

Les nanoparticules sont également utilisées pour leurs propriétés optiques et/ou « anti-UV » dans le secteur des cosmétiques, des papiers, des peintures, dans les textiles pour les propriétés antistatiques, optiques ou encore stabilisantes. Dans l'alimentaire, les NST peuvent apporter des propriétés rhéologiques ou être utilisés comme des systèmes supports.

Enfin dans l'énergie ou dans le domaine de l'environnement, les nanoparticules peuvent être utilisées dans le domaine du photovoltaïque, ou encore pour développer des propriétés antifongiques, antibactériennes ou encore des propriétés photocatalytiques pour filtres et membranes de filtration.

En nanomédecine, on retrouvera les nanoparticules dans la délivrance contrôlée de principes actifs, dans le développement de nano capteurs, etc.

Le NEDO (New Energy and industrial technology Development Organization) a réalisé une projection sur les différents marchés liés aux NST à l'horizon 2030. Le marché le plus porteur, ou plutôt celui qui développerait le plus de chiffres d'affaires, serait la micro- nano-électronique.

L'engouement des consommateurs pour certaines des fonctionnalités permises par les nanotechnologies (matériaux intelligents, écrans tactiles, etc.) corrobore cette analyse.

Il apparait également que les débats de la première décennie des années 2000 sur les risques « nano » n'ont pas entraîné de mouvement de rejet fort des nanosciences et nanotechnologies, contrairement à ce que la France a pu connaître avec les OGM.

A la fin des années 2010, la France met en place un plan national « nanosciences et nanotechnologies » avec pour ambition de contribuer à la redynamisation de l'économie en favorisant le développement d'innovations de rupture assurant un avantage compétitif aux industriels français. Ce plan est fondé sur quelques lignes de force : une coordination nationale des acteurs, des services partagés, une coopération entre recherche publique et industriels pour faire émerger et transférer rapidement des innovations de rupture.

Afin d'optimiser l'impact de l'action publique, une coordination est mise en place entre les principaux secteurs ministériels concernés (recherche, économie, industrie, santé, environnement, agriculture, défense, etc.). Elle a pour objet la mise en œuvre cohérente du plan national nanosciences et nanotechnologies, l'optimisation de l'impact des moyens engagés et la coordination des efforts de la recherche publique et de l'industrie tout au long de la chaîne de l'innovation. Elle inclue la mise en place de services partagés entre les acteurs de la recherche publique et de l'industrie.

Encadré 2 : vers un collège de correspondants en nanosciences et nanotechnologies au sein de l'ANR ?

Dans ce scénario, l'Agence française de financement de la recherche pourrait mettre en place un collège de correspondants en nanosciences et nanotechnologies qui seraient désignés dans chacun des défis pertinents. Ce

Par exemple, un système de traitement de l'information stratégique est utilisé comme outil d'aide à la décision, en appui sur les communautés scientifiques, technologiques et industrielles en nanosciences et nanotechnologies, et à leur profit. Les réseaux d'animation scientifique et technologique sont renforcés, par exemple par la création de

collège aurait trois rôles :
1) identifier des axes clefs en nanosciences et nanotechnologies, du fondamental au produit, dans chacun des défis sociétaux et dans le défi de tous les savoirs ;
2) suggérer des programmes phares ou flagships[20] scientifiques et technologiques pour des technologies, approches ou instrumentations nanosciences et nanotechnologies génériques pouvant impacter plusieurs défis sociétaux ou filières industrielles, pour les financer sur des actions focalisées de 3 à 5 ans : ces programmes phares permettent de favoriser les synergies interdisciplinaires, la diffusion des connaissances et savoir-faire inter-filières et d'assurer les conditions du renouveau industriel ainsi que l'avance française dans le développement d'outils génériques à fort impact transversal ;
3) détecter des pépites technologiques relevant d'un accompagnement spécifique pour assurer un transfert rapide vers le marché.

collèges de correspondants (**voir Encadré 2**) au sein de l'ANR. Ces actions, et d'autres, favorisent les échanges entre acteurs de la recherche publique et industriels : la France bénéficie au mieux de son investissement dans sa recherche publique et de sa qualité.

La structuration de la communauté des nanosciences et nanotechnologies est consolidée en amplifiant les actions entreprises dès les années 2000 (telles que le développement de plateformes technologiques telles que celles portées par le CEA-Leti, le programme RTB, le réseau C'Nano…). Les actions nécessaires sont conduites pour développer l'information auprès du grand public et assurer en particulier la transparence sur la connaissance et la gestion des risques éventuels liés aux nanosciences et nanotechnologies.

Un écosystème français favorable à l'innovation

L'objectif qui a prévalu à la création du plan nanosciences et nanotechnologies est le développement d'un écosystème propice à une innovation de rupture. Pour ce faire, l'association des acteurs de la recherche publique et les entreprises dès le début du processus d'innovation est reconnue comme une nécessité pour accroitre l'efficience du continuum recherche-innovation-marché. Le diagnostic repose sur un manque de continuité, en France, dans le processus de maturation technologique, sur les financements mobilisables et sur l'implication des acteurs. Dans la nouvelle approche, les pépites technologiques et scientifiques sont confrontées dès les premières étapes d'innovation aux besoins du marché pour permettre une montée progressive en TRL, et créer dès que possible le partenariat industriel permettant d'accélérer la mise sur le marché (**voir Encadré 3**).

Ainsi, recherche publique et industrie, associés en amont à la définition de ces projets, s'inscrivent dans le dispositif qui permet de renforcer les liens entre recherche amont et finalisée. De plus, les synergies entre les industriels sont consolidées au sein des filières, associant de manière vertueuse grands-groupes, PMEs et ETIs[21]. Ces développements sont conduits dans un climat de confiance générale fondé sur un consensus éclairé sur la gestion de la propriété intellectuelle, incluant une approche ouverte (open-science, open-innovation) et la coopération inter-entreprises quand cela est pertinent. Au sein des pôles de compétitivité concernés, l'ensemble des acteurs sont mobilisés autour des enjeux des nanosciences et nanotechnologies,

[20] Sans que ce terme ne doive prêter à confusion avec les initiatives Européennes, les deux Flagships du programme Future and Emerging Technologies, Graphene et Human Brain Project.
[21] Sous l'impulsion de politiques publiques et d'initiatives privées qui ne sont pas spécifiques aux nanosciences et nanotechnologies (pôles de compétitivité, initiatives de soutien à l'innovation…).

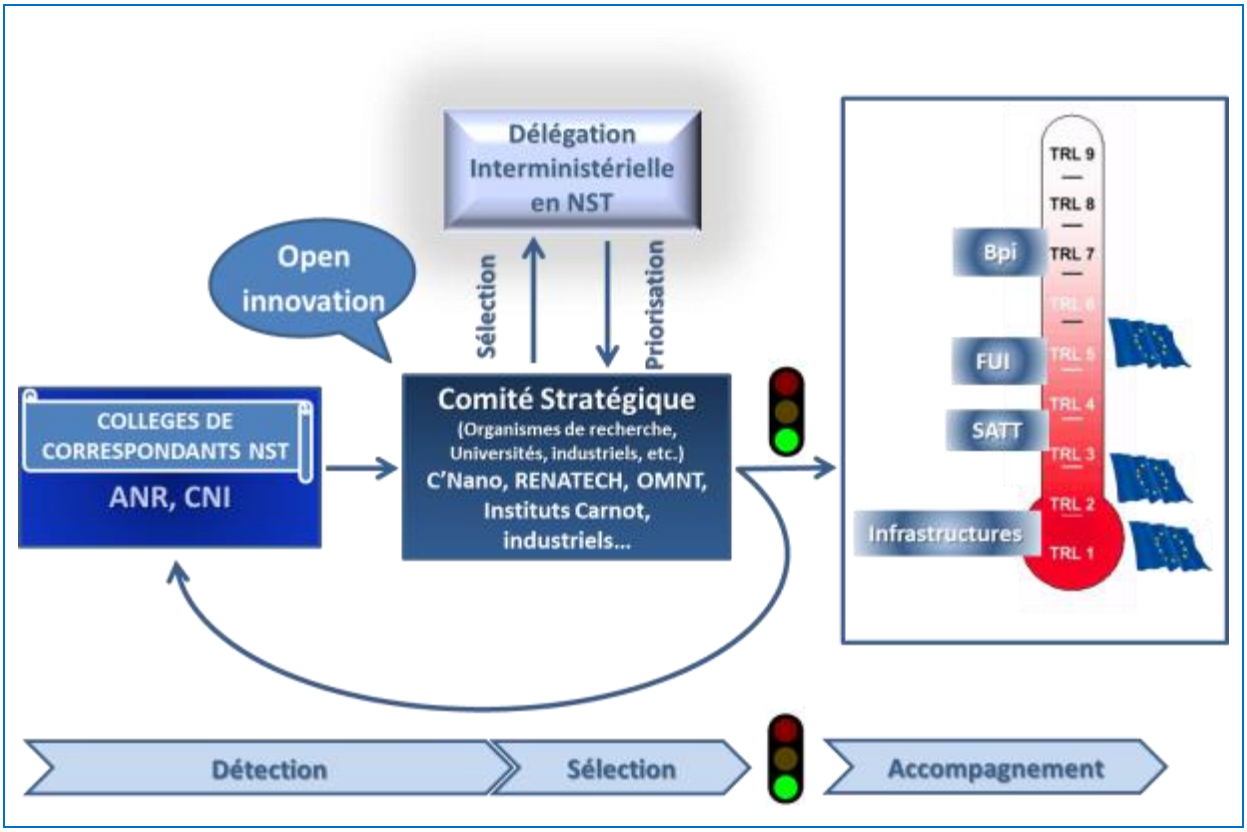
particulièrement pour tirer parti des compétences transversales (cf les défis transverses identifiés dans le cadre de la prospective scientifique de ce rapport).

Cet environnement, associé à une R&D poussée dans le domaine clef de la nano-fabrication (« nanomanufacturing »), permet d'accroitre la réactivité de l'industrie française face aux besoins technologiques et de marchés, et d'accélérer le développement de prototypes et la mise sur le marché de produits nanosciences et nanotechnologies français. La fuite de projets et cerveaux est ainsi stoppée et l'écosystème français devient un des pôles d'attraction mondiaux. Le couplage amont-aval et le bon équilibre entre la recherche publique et le monde industriel sont des éléments clefs permettant à la fois de maintenir une recherche amont au meilleur niveau international, de couvrir le continuum amont-aval, et de préparer les ruptures technologiques. Ces avancées favorisent un renouveau de l'industrie française.

Le marché de l'emploi en nanosciences et nanotechnologies est dynamique et, grâce notamment à la création de nouvelles filières, augmente plus vite que la courbe de l'emploi global. Des réseaux rassemblant acteurs de l'innovation, de la recherche et acteurs du milieu éducatif permettent une réflexion et la mise en place de formations, modules de formation, formations professionnelles ou continues spécifiques des nanosciences et nanotechnologies, interdisciplinaires et adaptées aux besoins de la recherche et industriels. Le renforcement des interactions entre laboratoires publics et industriels et la politique volontariste de création de filières nanosciences et nanotechnologies ont de plus accru l'attractivité des formations doctorales dans le domaine, assurant la disponibilité d'une main d'œuvre qualifiée, elle-même facteur d'attractivité pour l'industrie.

Encadré 3 : vers un processus de maturation de pépites technologiques selon un modèle d'innovation ouverte ?

*Les collèges de correspondants nanosciences et nanotechnologies, par exemple au sein de l'ANR (**voir encadré 2**) pourraient contribuer à la détection des projets et technologies à fort potentiel pour permettre à ces projets de trouver un mode de financement favorisant leur poursuite et leur ascension en niveau de maturité technologique (typiquement aux TRL>3, en appui sur les structures de valorisation et de transfert mobilisées (SATT, pôles de compétitivité, financements FUI ou BPI…) et au travers de partenariats industriels.*



Un développement responsable des nanosciences et nanotechnologies accompagné par un échange éclairé entre science et société

Dans un contexte de recherche et d'innovation responsables, la société française perçoit les bénéfices des nanosciences et nanotechnologies tout en restant vigilante sur les risques potentiels, ces derniers étant étudiés. L'approche « safer by design » pour la conception des produits intégrant des matériaux et/ou nanotechnologies est privilégiée par les industriels français dans les secteurs pertinents, en cohérence avec la réglementation protectrice de l'environnement et de la santé.

Une position forte de l'Europe avec une construction et une vision européennes partagées

La France réussit à impulser à l'Europe, en partenariat avec l'Allemagne notamment, une politique concertée de promotion de la recherche et de l'innovation en nanosciences et nanotechnologies.

Une étude des forces et faiblesses des différents pôles européens, et la définition de filières stratégiques européennes en nanosciences et nanotechnologies, a permis d'identifier les atouts et complémentarités des savoir-faire de chaque pays dans les différents domaines scientifiques et filières industrielles concernés par les nanosciences et nanotechnologies, et de les exploiter en synergie. L'Europe soutient aux divers niveaux de TRL les projets de recherche, permettant aux industriels de collaborer sur des problématiques communes à un niveau pré-concurrentiel. Des pôles d'excellence européens présentant des savoir-faire spécifiques et complémentaires sont favorisés. L'Europe réussit ainsi à créer un environnement dynamique pour ses chercheurs académiques, start-up, PME et grands groupes et à fédérer les acteurs des

nanosciences et nanotechnologies, en particulier pour les filières nanosciences et nanotechnologies émergentes.

Pour des raisons géopolitiques et stratégiques, afin de garder son indépendance vis-à-vis des autres puissances internationales, l'Europe met certainement un accent particulier sur certaines filières industrielles où les nanosciences et nanotechnologies prennent une place grandissante sur le territoire européen, par exemple les transports (automobile, ferroviaire et aéronautique) ou encore le recyclage et la dépollution des matières premières, telles que les terres rares. Les filières pour lesquelles l'Europe identifie un positionnement international stratégique, notamment la santé et les TIC, sont également particulièrement soutenues pour permette à l'Europe d'y conserver ou acquérir une place de leader.

Comme la France, l'Europe se caractérise également par sa prise en compte des attentes sociétales, au travers d'un investissement conséquent dans la recherche et l'innovation sur des projets étudiant les effets potentiellement néfastes des nanosciences et nanotechnologies sur la santé et l'environnement, sur des projets ciblant le développement de dispositifs biomédicaux (organes artificiels, thérapies ciblées et personnalisées, neurotechnologies, opto-génétique, etc.) ou encore le traitement des eaux et de l'air (membranes réactives, dépollution in-situ, etc.). L'Europe adopte une réglementation éclairée vis-à-vis des nanomatériaux et incite à l'approche « safer by design » pour limiter les risques sanitaires. Enfin, elle s'implique fortement dans les instances de normalisation internationales relatives aux nanosciences et nanotechnologies.

Développement de coopérations internationales stratégiques

Afin d'assurer son leadership sur la scène internationale, l'Europe mène une stratégie double. D'une part, elle capitalise et pérennise ses interactions avec les leaders mondiaux que sont les USA, la Chine et le Japon. D'autre part, elle prend de l'avance concernant sa position vis-à-vis de pays ayant émergé plus récemment dans la course mondiale aux nanosciences et nanotechnologies, en mettant en place des échanges scientifiques et commerciaux privilégiés (Inde…). Ces interactions concernent la recherche publique comme l'industrie. Ces partenariats permettent une harmonisation progressive et favorable au développement de l'industrie Européenne : règlementations, reconnaissance mutuelle des règles et normes en vigueur facilitant les exportations, les importations et les investissements en nanosciences et nanotechnologies. Au niveau de la R&D, les interactions entre l'Europe et les USA se renforcent, tout comme avec le Japon sur des champs plus spécifiques (MEMS, de la robotique et des micro- et nano-machines…), et avec la Corée du Sud, elles émergent avec la Chine.

Les relations développées avec des puissances scientifiques et économiques émergentes comme la Russie, le Brésil et l'Inde, peut-être même l'Iran, ont créé de solides partenariats alors que ces pays deviennent des puissances de plus en plus considérables sur le plan économique.

Ainsi, dans un paysage international multi-pôles caractérisé par la montée en puissance de pays émergents hautement compétitifs dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies (Inde, Corée, Iran, Russie…) et par le renforcement d'un axe US-Chine, l'Europe arrive à s'imposer et à créer des coopérations internationales stratégiques dans un marché des nanotechnologies en pleine expansion.

Des exemples d'initiatives françaises allant dans le sens de cette construction à l'international sont rassemblés dans l'encadré 4, ci-dessous.

Encadré 4 : contributions à la construction de filières internationales en nanosciences et nanotechnologies dans l'électronique et la photonique du futur.

Dès aujourd'hui, les acteurs de la recherche publique française nouent des liens significatifs à l'étranger. A titre d'exemples, le CNRS, la Nanyang Technological University (NTU) de Singapour et Thales ont créé une Unité Mixte Internationale (UMI), baptisée CINTRA : CNRS International – NTU – Thales Research Alliance. Les recherches au sein de cette entité, basée à Singapour, s'orientent autour des nanotechnologies pour l'électronique, la photonique du futur et les applications associées. « Ce laboratoire, implanté dans les locaux de la NTU, devrait jouer un autre rôle important : il devrait servir de canal pour le transfert de connaissances scientifiques et technologiques, d'avancées et d'innovations technologiques entre Singapour et la France. » (Dr Su Guaning, Président de la NTU). Aux Etats-Unis, un LIA Nanoelectronics, from new phenomena to low power electronics, a été créé avec l'Université de Californie en appui en France sur l'Institut d'Electronique Fondamentale, l'Institut Jean Lamour et l'UMR CNRS-Thalès. Le CEA-LETI maintient une présence permanente aux Etats-Unis et au Japon où sont régulièrement organisés des Leti Days à destination des industriels locaux (2015 verra les 11ème Leti Days à Tokyo).

Récapitulatif des points clefs du scenario 4

- Politique volontariste proactive et coordonnée en France avec la mise en place d'un Plan National en nanosciences et nanotechnologies ;
- Mise en place d'un écosystème français propice à la recherche et à l'innovation de rupture ;
- Vigilance de la société française vis-à-vis des risques mais ils sont connus, innovations safer by design répandues et menées en cohérence avec la réglementation ;
- Construction et vision européennes partagées pour la promotion de la recherche et de l'innovation en nanosciences et nanotechnologies impulsées par la France ;
- Politique proactive de coopérations internationales stratégiques ;
- Marché de l'emploi en nanosciences et nanotechnologies dynamique en France et en Europe.

3-3- Rapport du séminaire nanoéthique

Le moment actuel dans la discussion science-société se caractérise par l'attention portée à la notion de responsabilité. À l'échelle européenne, le cadre RRI (innovation et recherche responsables) occupe une place de choix dans le programme de recherche Horizon 2020. A l'échelle nationale, les agences de financement de la recherche focalisent leurs efforts sur la figure du scientifique, placée au centre des projets sociologiques, philosophiques, juridiques et éducatifs. Il est généralement constaté que le manque d'expérience ou de compétence dans le domaine science-société empêche le scientifique d'analyser de façon adéquate les phénomènes sociaux relatifs à son domaine, or la *responsiveness* (aptitude à s'engager dans un débat sociétal et être prêt à répondre de ses actes) est aujourd'hui fondamentale pour la légitimation de la recherche scientifique.
Les actions ont été étudiées sur les exemples néerlandais, allemand et américain. Elles incluent : a) des modules et des cours sur la thématique science-société aux écoles d'ingénieurs et universités ; b) des compétitions scientifiques à l'instar du concours iGEM en biologie de synthèse.

Tous les financements en nanosciences et nanotechnologies dans certains pays (Pays-Bas, Norvège) contiennent une obligation pour les personnes financés de suivre une formation (un cours ou un module) sur les relations science-société. La majorité de jeunes chercheurs participent à un court workshop délibératif, mais certains s'impliquent développent des collaborations avec chercheurs en sciences sociales qui débouchent sur des publications. Le caractère obligatoire de l'action des agences de financement est crucial : cette mesure permet également d'impliquer dans les discussions les chercheurs confirmés (chefs de laboratoires ou de projets).

Les exercices d'anticipation et de délibération développés par les chercheurs en sciences sociales et proposés aux doctorants en sciences peuvent s'articuler autour d'un scénario fictif (fictive script), d'un problème de roadmapping ou d'une étude des voies d'impact (impact pathways). Dans chaque cas, le groupe discute de l'intégration des résultats scientifiques dans la vie de la société, de leur conformité à la réglementation et de leur acceptabilité sociale.

L'étude des « voies d'impact » est particulièrement utile pour de faciliter l'élaboration et la rédaction des réponses aux appels à projets, sous forme d'une « spéculation contrôlée » qui permet d'envisager des scénarios futurs d'une manière structurée.

4- Liste des experts invités au séminaire de prospective organisé par l'axe « Impact technologique, valorisation industrielle et marché »

NOM	Prénom	Société
ADOU MACHECLER	Mélissa	CCI- Essone
AIME	Jean-Pierre	CBMN (CNRS)
ANDRIEUX	Karine	SFNano
BARRAL	Katia	CNRS
BERGER	Sébastien	OMNT
BERGINC	Gérard	Thalès Optronique
BERNARD	Daniel	CEA- PNS
BILLON	Thierry	CEA- LETI
BOISARD	Caroline	CNRS
BOLY	Vincent	ERPI (Université de Lorraine)
BOTTERO	Jean-Yves	CEREGE (CNRS)
BOUJU	Xavier	CEMES (CNRS), C'Nano GSO
BOURNEL	Arnaud	IEF (Université Paris Sud)
CARIMALO	Julie	CNRS- C'Nano
CATHALA	Bernard	INRA
CHANEAC	Corinne	LCMCP (UPMC), C'Nano IdF
CHASKIEL	Patrick	CERTOP (Université Toulouse II)
DALENCON	Lauriane	Solvay
DE JOUVENEL	François	Futuribles
DE LABACHELERIE	Michel	CNRS
DE PUYDT	Yves	Biophy Research
DELALANDE	Stéphane	PSA Peugeot Citroën
DIEM	Bernard	CEA- LETI
DRAIS	Eric	INRS
DUBOIS	Jean-Marie	IJL (CNRS), C'Nano GE
DUBOUCHET	Thomas	Nanothinking
DURAND	Catherine	CEA- PNS
ESCOUBAS	Ludovic	IM2NP (AMU)
FAGES	Volny	ENS Cachan
FAINI	Giancarlo	CNRS
FARCHI	Alain	CEA- INAC
FAVRE	Georges	LNE
FONTAINE	Alain	SFP/ CNRS
GABRIEL	Jean-Christophe	CEA-DSM
GAFFET	Eric	CNRS- IJL
GIRARD	Philippe-Franck	TOTAL

GRANDHAIE	Fabrice	Saint-Gobain Weber
GREFFET	Jean-Jacques	Institut d'Optique
GRINBAUM	Alexei	CEA- Saclay
HENRIO	Françoise	CEA- OMNT
JARRIGE	Raphaëlle	CNRS- DIM nanoK, C'Nano
LACOUR	Stéphanie	CNRS
LAFON		
LAMBERT	Philippe	IJL/CNRS- C'Nano
LEFEBVRE LEGRY	Patricia	IEMN (CNRS)
LEVENSON	Ariel	CNRS- C'Nano
LIGHEZZOLO-ALNOT	Joëlle	INTERPSY (Université de Lorraine)
MARCHI	Florence	Institut Néel (UJF)
MONCOQ	Damien	CNRS
MORO	Claire	CEA- Grenoble
MOSSUZ	Véronique	CEA- Grenoble
NANTEUIL	Marjorie	CNRS
NGUYEN VAN DAU	Frédéric	UMR CNRS- Thales
PANISSAL	Nathalie	RFTE (Université Toulouse 2)
PARIS	Emmanuel	Bruker nano
PEYRET	Olivier	CEA- LETI
PRIEM	Thierry	CEA- LITEN
PUJOL	Jean-Luc	MaR/S (INRA)
RANNOU	Patrice	CEA-OMNT
ROURE	Françoise	CGEIET
SALVETAT	Anne-Sophie	CNRS- C'Nano
SCHUHL	Alain	Institut Néel (UJF)
SPALLA	Olivier	ANR
SURAUD	Marie-Gabrielle	CERTOP (Université de Toulouse 2)
THACHIL	Elodie	CNRS- C'Nano
THOMAS	Dominique	STMicroelectronics
VUKADINOVIC	Nicolas	Dassault aviation

5- Membres du comité opérationnel du projet

Nom	Fonction et rattachement	Mission confiée
Eric GAFFET	Directeur de l'Institut Jean Lamour, CNRS	**Coordinateurs ARP 4N,** Pilotes axe 4 « international »
Yves SAMSON	Directeur de l'Institut nanosciences et cryogénie, CEA	
Bernard CATHALA	Directeur-adjoint de l'unité Biopolymères, Interactions, Assemblages (BIA), INRA	Pilotes axe 1 « prospective scientifique »
Giancarlo FAINI	Directeur adjoint scientifique, Institut de Physique, CNRS	
Jean-Christophe GABRIEL	Adjoint du directeur du programme transversal nanosciences, CEA	
Michel de LABACHELERIE	Directeur de FEMTO-S, CNRS	
Sylvain ALLANO Stéphane DELALANDE	Directeur scientifique et technologies futures, PSA Peugeot Citroën Adjoint au Directeur Scientifique	Pilotes axes 2-3 « impact technologique, marché »
Gérard BERGINC	Responsable des études amont, Thales Optronique	
Ariel LEVENSON	Directeur du réseau C'Nano, CNRS	
Olivier PEYRET	Adjoint « science » du directeur du LETI, CEA / Coordinateur du Programme de Direction au LETI, CEA	
Alexei GRINBAUM	Chercheur, philosophe des sciences (CEA)	Pilotes axe transverse « Nanosciences, Nanotechnologies et Société »
Stephanie LACOUR	Chercheuse, juriste - droit des nanotechnologies (CNRS, C'Nano)	
Sébastien BERGER	Directeur de l'OMNT (Unité mixte de service CEA-CNRS)	Associé aux délibérations du COP au titre de la contribution de l'OMNT à l'axe 1

6- Remerciements

Sans la confiance et le financement accordé par l'ANR aux coordinateurs du projet, ce rapport n'aurait pu naitre.
Les remerciements les plus vifs vont donc en premier à l'ANR, et particulièrement aux **membres du comité de pilotage** mis en place, qui ont suivi et évalué les développements du projet : Jean-Yves BERTHOU (ANR), Jean-Pierre CHEVALIER (ANR), Philippe GAUCHER (MESR), Marc HIMBERT (CNAM), Françoise ROURE (MEIN), Didier THERON (MESR), Olivier SPALLA (ANR).

Dans le cadre des travaux conduits, les coordinateurs de l'axe 2-3 du projet ont bénéficié de nombreux appuis, dont :

- **Cabinet de Conseil Futuribles** : Véronique LAMBLIN, François DE JOUVENEL
- **Equipe en soutien** : BOLY Vincent (ERPI, Université de Lorraine), CARIMALO Julie (CNRS- C'Nano), HENRIO Françoise (OMNT), JARRIGE Raphaëlle (CNRS, DIM NanoK/ C'Nano), LAMBERT Philippe (IJL, C'Nano), SALVETAT Anne-Sophie (CBMN, C'Nano), THACHIL Elodie (CNRS- C'Nano)
- **Services et Instituts du CNRS** :
  - *Stratégie de l'Innovation et Partenariats Industriels de l'Institut de Physique du CNRS*
    BOULAY-LAURENT Nathalie, NANTEUIL Marjorie
  - *Plateformes et TGIR de l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes du CNRS*
    BOISARD Caroline
  - *Direction de l'Innovation et des Relations avec les Entreprises du CNRS*
    BARRAL Katia, CHASSAGNE Catherine, MUSSET Laurence

Les **antennes régionales du réseau C'Nano** (GE, GSO, IdF, NO, PACA, RAA) ont fortement contribué à la mobilisation de la communauté scientifique et industrielle ainsi que des acteurs locaux.

L'**OMNT** a accepté de joué le jeu de ce projet, et de mobiliser ses experts (bénévoles) dans un exercice inédit, pour l'Observatoire, de prospective scientifique. Nous remercions le CEA et le CNRS, associés dans la gouvernance de l'OMNT, pour avoir accepté que l'Observatoire joue ce rôle.

Enfin, les co-organisateurs de cet ARP, E. GAFFET (CNRS) et Y. SAMSON (CEA) remercient très chaleureusement **l'ensemble des participants aux différents groupes de travail** qui ont permis de construire, en permettant le rassemblement d'une expertise large et diversifiée, des conclusions aussi pertinentes que possibles.

7- Annexe

Les documents regroupés dans cette annexe ont été produits par le comité opérationnel de l'axe 2-3 avec l'aide de l'équipe de soutien et sous la direction de C'Nano. Ils ont été fournis aux experts et enrichis par ces derniers à l'occasion du séminaire de prospective.

7-1- Exemple de fiche d'analyse de l'impact des nanosciences et nanotechnologies

EXEMPLE DE FICHE D'ANALYSE DE L'IMPACT DES NST DANS CHAQUE DEFI SOCIETAL DE L'ANR

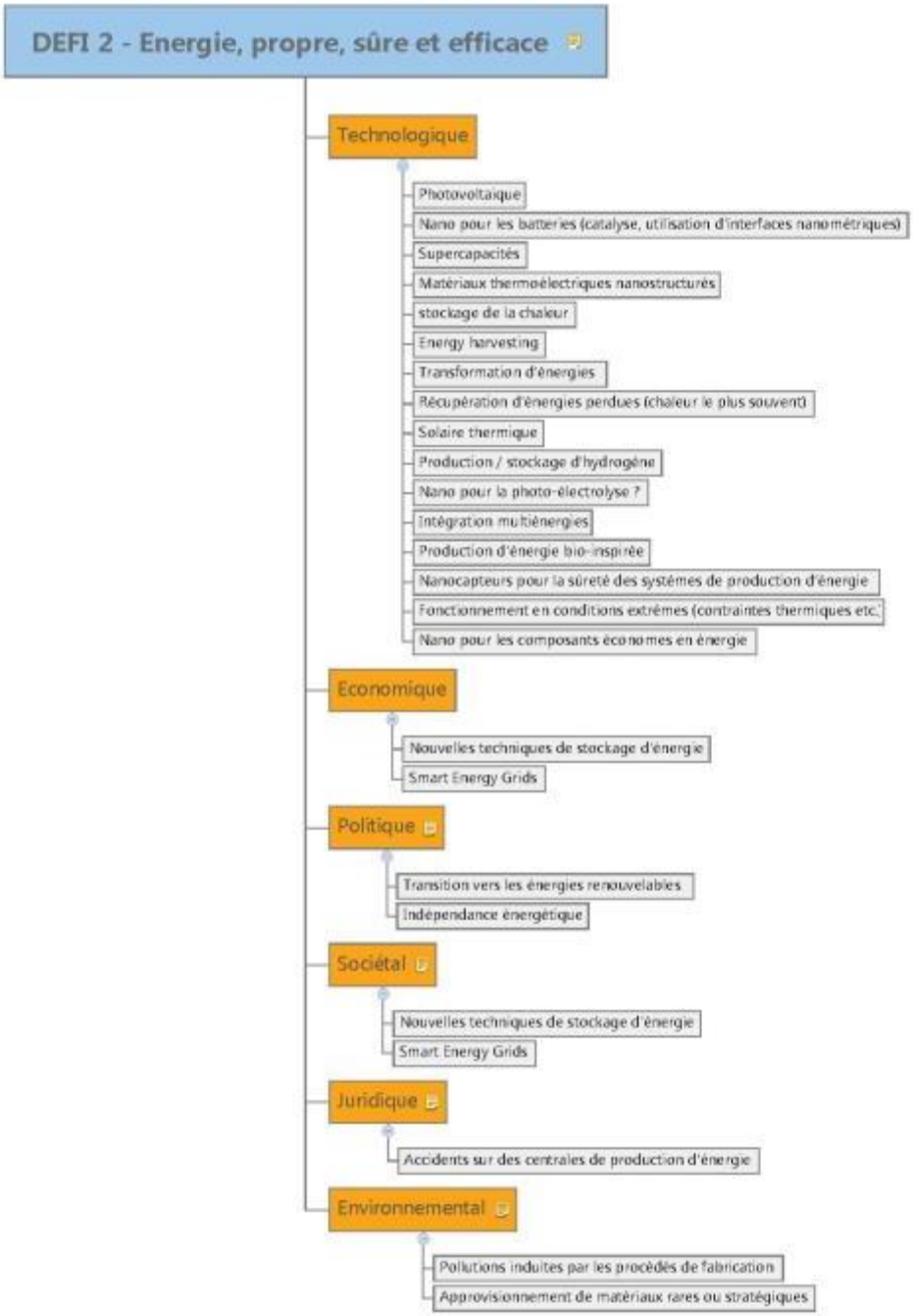


Figure 1 : Fiche défi 2 « Energie sure, propre et efficace »

EXEMPLES D'ANALYSE DE L'IMPACT DES NST DANS LA CHAINE DE VALEUR INDUSTRIELLE ET LES FILIERES INDUSTRIELLES STRATEGIQUES FRANÇAISES

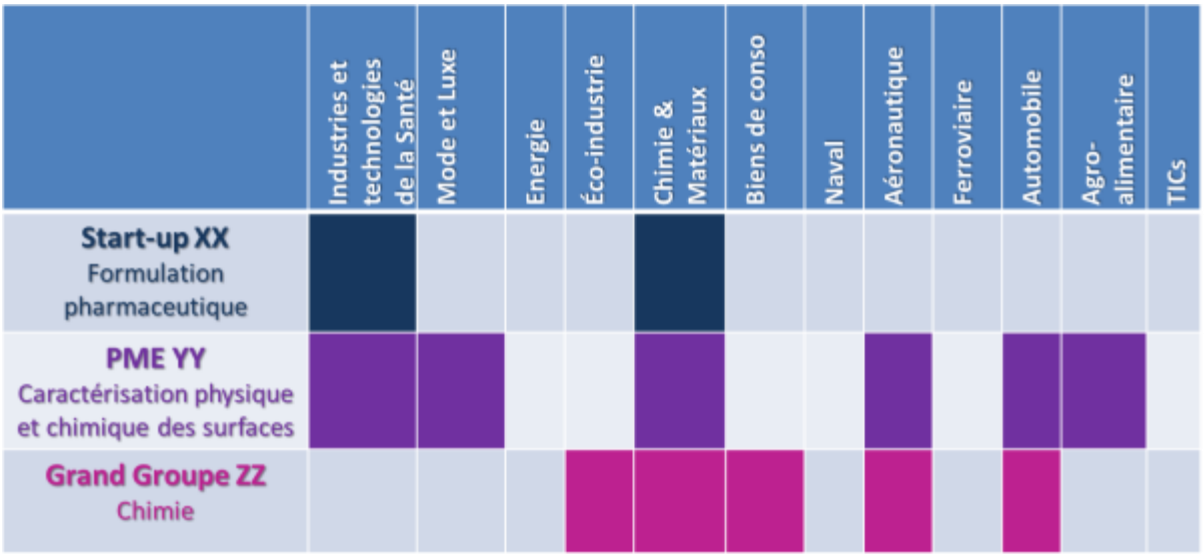


Figure 2 : Diffusivité des NST à travers les filières industrielles stratégiques françaises
Pour des raisons de confidentialités, le nom des entreprises n'est pas mentionné.

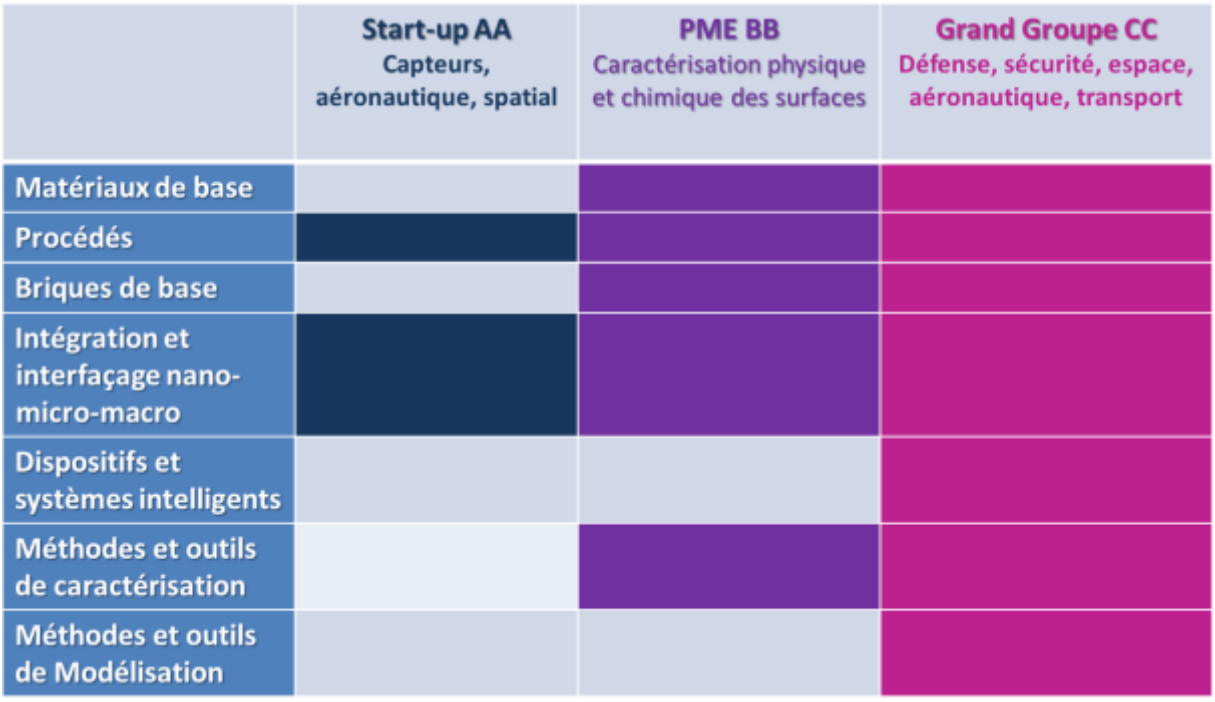


Figure 3 : Diffusivité des NST par rapport à la chaîne de valeur industrielle
Pour des raisons de confidentialités, le nom des entreprises n'est pas mentionné.

7-2- Résultat de l'enquête auprès des experts

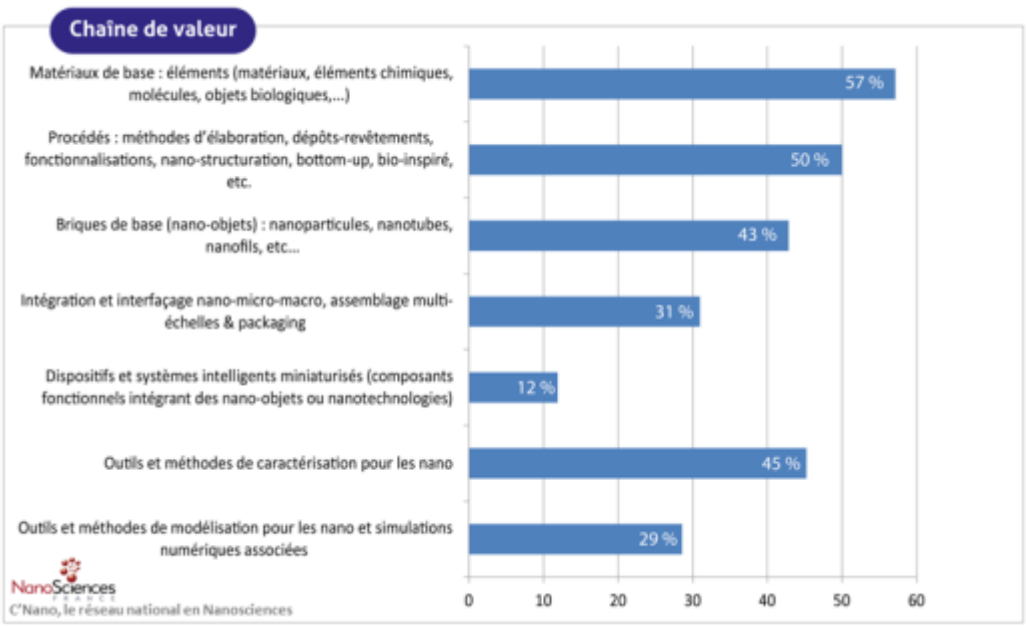


Figure 4 : Cartographie de la chaîne de valeur des industriels ayant répondu au questionnaire

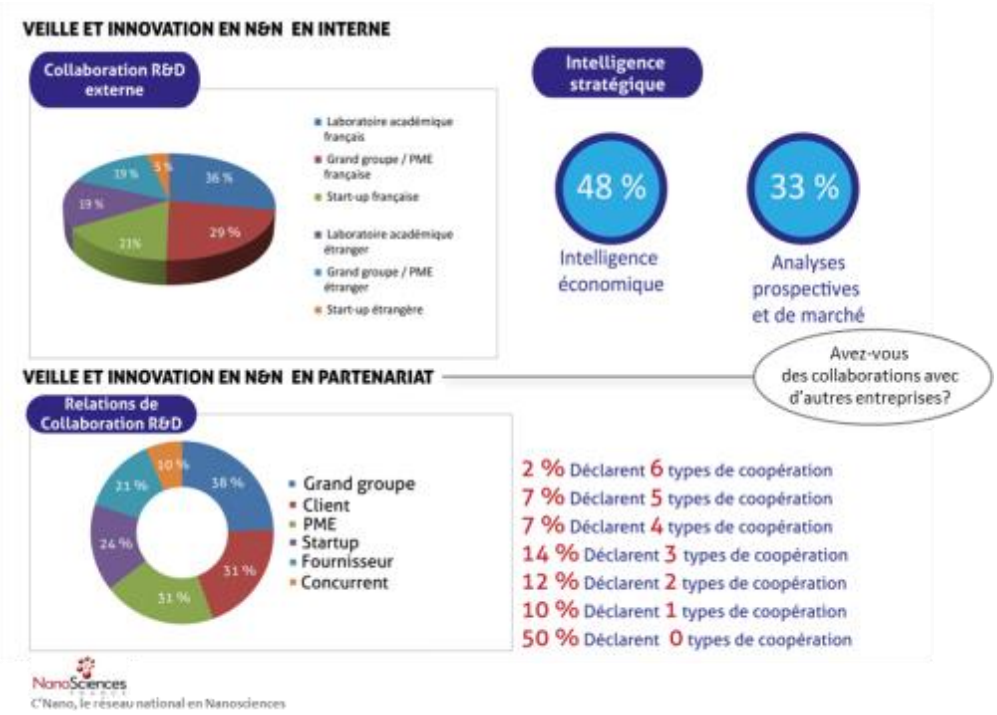


Figure 5 : Veille et innovation en Nanosciences et Nanotechnologies (N&N) en interne et en partenariat chez les industriels ayant répondu au questionnaire

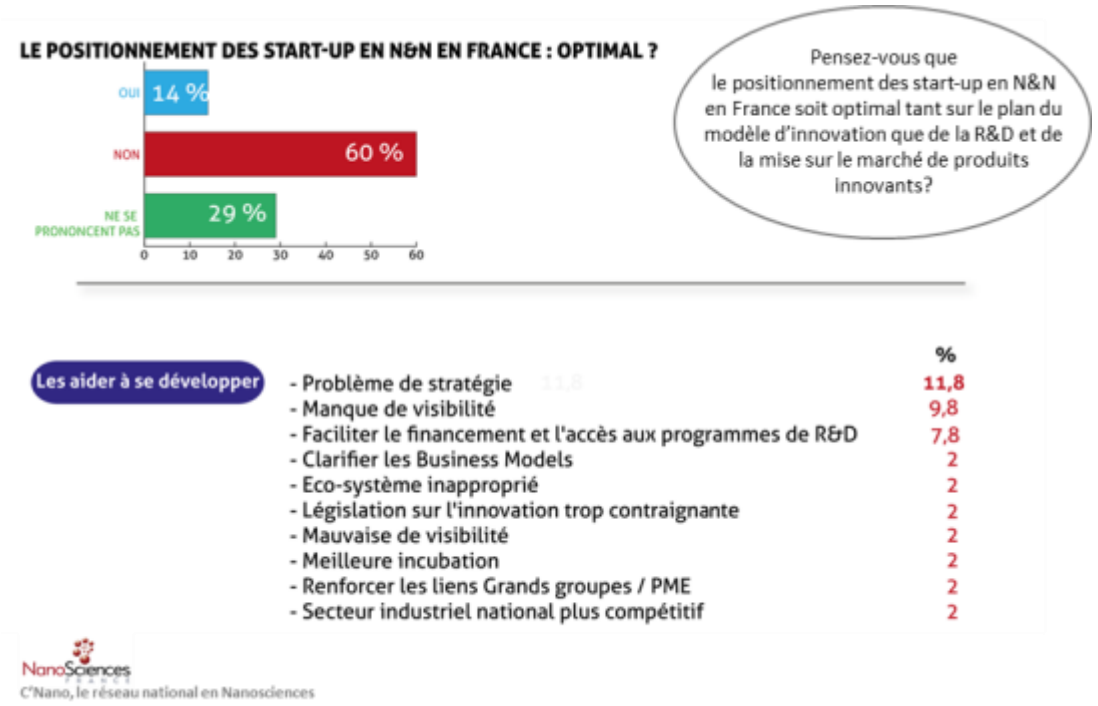


Figure 6 : Réponse des industriels sur le positionnement des start-up françaises en nanotechnologie

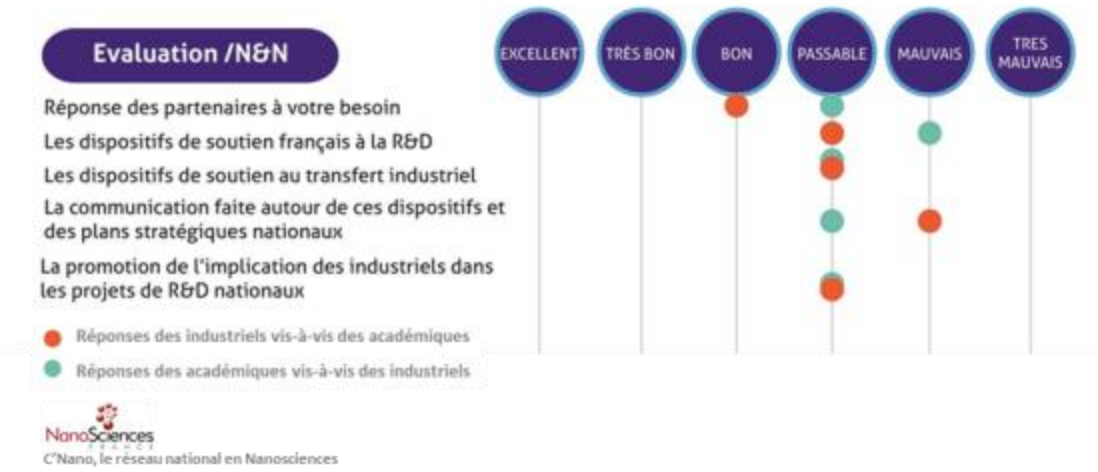


Figure 7 : Vision croisée des acteurs industriels et académiques dans les N&N sur les dispositifs de soutien à la R&D

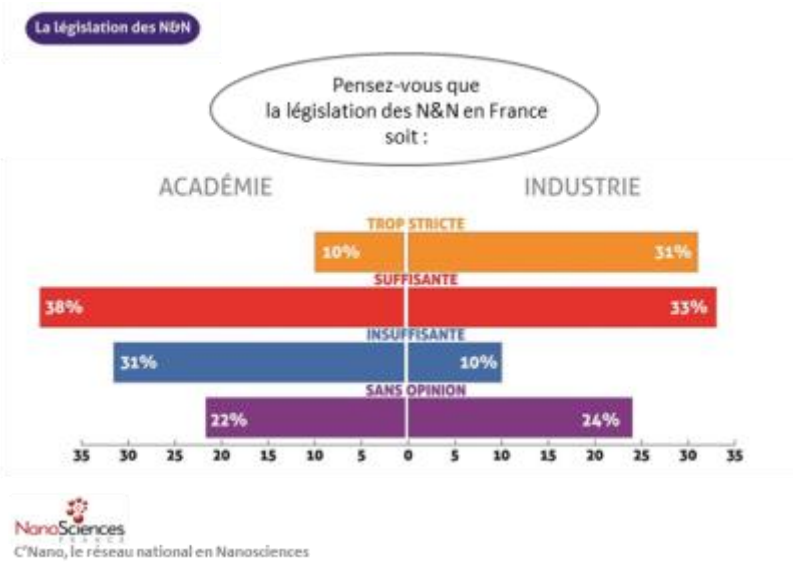


Figure 8 : Vision croisée des acteurs industriels et académiques sur la législation des N&N

A ces données chiffrées, s'ajoutent des données qualitatives obtenues lors des interviews menées auprès d'une quinzaine d'industriels, lors desquelles la grande majorité des interrogés a exprimé la difficulté liée au hiatus existant entre l'obligation de déclaration et de réglementation vis-à-vis des substances à l'état nanoparticulaire et la diversité des méthodes de mesure et des modes opératoires non comparables.

7-3- Programme du séminaire d'experts

Université Paris Diderot, Bâtiment Condorcet, Paris

	Mercredi 22 octobre		
08h30-09h00	***Accueil*** *Salle Luc Valentin- 454 A (Bâtiment A, 4ème étage)*		
09h00-09h45	**Introduction** *Salle Luc Valentin- 454 A (Bâtiment A, 4ème étage)*		
	Changement de salle		
10h00-12h15	**Atelier** **« Risques et gestion des risques sanitaires et environnementaux »** *Salle Alechinsky- 437 A (Bâtiment A, 4ème étage)*	**Atelier** **« Perceptions des NST »** *Salle Kandinsky- 631 B (Bâtiment B, 6ème étage)*	**Atelier de brainstorming sur les technologies d'avenir** *Salle Klein- 371 A (Bâtiment A, 3ème étage)*
12h15-13h15	***Pause-déjeuner*** *Salle Luc Valentin- salle 454 (Bâtiment A, 4ème étage)*		
13h15-15h30	**Atelier 1** **« Relations académie-industrie » et « Relations entre acteurs industriels »** *Salle Alechinsky- 437 A (Bâtiment A, 4ème étage)*	**Atelier 2** **« Relations académie-industrie » et « Relations entre acteurs industriels »** *Salle Kandinsky - 631 B (Bâtiment B, 6ème étage)*	**Atelier** **« Formation des NST » et « Perspectives d'emplois »** *Salle Klein- 371 A (Bâtiment A, 3ème étage)*
15h30-16h00	***Pause-café*** *Salle Luc Valentin- salle 454 A (Bâtiment A, 4ème étage)*		
16h00-17h15	**Atelier « Encadrement des NST »** *Salle Klein- 371 A (Bâtiment A, 3ème étage)*		
17h15-18h30	**Atelier « Demande et marché des NST »** *Salle Kandinsky- 631 B (Bâtiment B, 6ème étage)*		

<table>
<tr><th></th><th colspan="4">Jeudi 23 octobre</th></tr>
<tr><td>09h00-11h15</td><td colspan="2">Atelier
« Pôles de R&D et de production mondiaux »
Salle Alechinsky- 437 A
(Bâtiment A, 4ème étage)</td><td colspan="2">Atelier
« Pilotage de la recherche et de l’innovation »
Salle Klein - 371A
(Bâtiment A, 3ème étage)</td></tr>
<tr><td>11h15-11h45</td><td colspan="4">Pause-café
Salle Mondrian- 646 A (Bâtiment A, 6ème étage)</td></tr>
<tr><td>11h45-13h15</td><td colspan="4">Restitution des ateliers B88
Salle Luc Valentin- 454 A (Bâtiment A, 4ème étage)</td></tr>
<tr><td>13h15-14h15</td><td colspan="4">Pause déjeuner
Salle Mondrian- 646 A (Bâtiment A, 6ème étage)</td></tr>
<tr><td>14h15-15h45</td><td>Atelier 1 de brainstorming sur les scenarii
Salle Alechinsky- 437 A
(Bâtiment A, 4ème étage)</td><td>Atelier 2 de brainstorming sur les scenarii
Salle Klein - 371 A
(Bâtiment A, 3ème étage)</td><td colspan="2">Atelier 3 de brainstorming sur les scenarii
Salle Gris - 734 A
(Bâtiment A, 7ème étage)</td></tr>
<tr><td>15h45-16h15</td><td colspan="4">Pause-café
Salle Mondrian- 646 A (Bâtiment A, 6ème étage)</td></tr>
<tr><td>16h15-17h15</td><td colspan="4">Restitution des ateliers sur les scenarii et conclusions
Salle Luc Valentin- 454 A (Bâtiment A, 4ème étage)</td></tr>
</table>

Figure 9 : Programme du séminaire d’experts

7-4- Composantes et variables

Identification des composantes et variables clefs

Composantes	Variables
Géo-économie et stratégie mondiale	V1- Pôles de R&D et de production mondiaux V2- Demande et marché NST à l'international
Ecosystème de l'innovation française en NST	V3- Pilotage de la recherche et de l'innovation V4- Relation Académie-industrie V5- Relations entre acteurs industriels V6- Formation en NST V7- Perspective d'emplois liés aux NST
Sécurité, gestion du risque et perception sociale	V8- Perception des NST V9- Législation et encadrement des NST V10- Risques et gestion des risques sanitaires et environnementaux

Figure 10 : Composantes et variables de contexte identifiées

VARIABLE V1 « POLES DE R&D ET DE PRODUCTION MONDIAUX »

Rédacteurs : Elodie THACHIL (CNRS- C'Nano), Julie CARIMALO (CNRS- C'Nano), Ariel LEVENSON (CNRS- C'Nano)

Données sur la Chine fournies par le bureau du CNRS de Chine

Définition de la variable et indicateurs

Cette fiche s'intéresse aux pôles, c'est-à-dire aux pays et régions du monde présentant un dynamisme particulier en termes de recherche, développement et production dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies (NST). Elle traite de leurs positionnements à l'échelle. Le but de cette fiche n'est pas d'être exhaustive mais de de présenter quelques pôles de R&D et de production mondiaux présentant un intérêt particulier dans les NST. Nous avons ainsi choisi de ne pas traiter en détails certains pays leaders bien identifiés comme le Japon, l'Allemagne ou Israël et nous nous sommes limités à décrire les modèles américain et européen dans la catégorie des superpuissances. Il nous a paru particulièrement pertinent et plus intéressant d'attirer l'attention du lecteur sur l'essor fulgurant de pôles émergents d'Asie du Sud qui présentent depuis quelques années un fort dynamisme dans les NST : le lecteur y trouvera ainsi un focus sur la Chine, l'Inde ou l'Iran pour ne citer que quelques exemples.

L'activité de ces pôles peut être évaluée à travers les initiatives et programmes nationaux qu'ils ont lancés ou l'implémentation de centres de production. La part des dépenses publiques et des investissements privés par les industriels, l'évolution du capital-risque témoignent également de la confiance des investisseurs dans les nanotechnologies.

De plus, le nombre de publications, le nombre de brevets déposés, le facteur h, constituent des indicateurs pertinents du retour sur investissements sur la génération d'innovations ou d'avancées scientifiques. Enfin, la création de start-up, le nombre de brevets et d'entreprises utilisatrices ou productrices de nanomatériaux, la production annuelle illustrent le dynamisme des différents pôles et leurs capacités à valoriser l'innovation en création de valeurs.

Rétrospective

Le début des années 2000 a été marqué par le démarrage de la course internationale au développement des nanosciences et nanotechnologies (NST). En effet, de nombreux pays ont pris conscience de l'enjeu majeur de ces nouvelles technologies dont le fort potentiel d'innovation porte la promesse d'une véritable révolution dans de nombreux domaines de recherche et secteurs industriels. Un grand nombre d'initiatives et de programmes de recherche nationaux ont ainsi été lancés[22].

Dans cette course aux NST, trois profils de pays peuvent être distingués : les superpuissances, comme les Etats-Unis, le Japon et l'Europe, les pays à économie stable, et les pays émergents comme l'Inde, la Chine ou la Malaisie.

[22] *Who is winning the global nanorace*?, Nature Nanotechnology, Novembre 2006

Les programmes de R&D au niveau mondial

Le modèle américain

C'est le lancement en automne 2000 de l'Initiative Nationale pour les Nanotechnologies (NNI), un programme fédéral américain dédié à la coordination et au financement des NST, qui a été le véritable point de départ de la course aux NST.

Le NNI a été créé avec pour mission d'assurer, sur du long terme, le financement de la recherche exploratoire en NST, le développement d'infrastructures adaptées, la formation d'un personnel qualifié et la coopération transdisciplinaire. Aujourd'hui, une vingtaine de départements, agences et commissions indépendantes participent à ce programme parmi lesquels onze bénéficient d'un budget de R&D spécifique aux NST. C'est le cas de la NSF (*National Science Foundation*), le NIH (*National Institute of Health*), le NIST (National Institue of Standards ans Technology), le DOE (*Department of Energy*) et le DoD (*Department of Defense*). Evalué tous les 3 ans, le NNI propose des plans stratégiques basés sur un management par objectifs opérationnels (*Program Component Areas, PCA*) et bénéficie, depuis sa création, d'un appui soutenu de la Maison Blanche et du Congrès.

Entre 2006 et 2011, la recherche exploratoire a constitué une priorité de financement du NNI, à travers une ventilation de 75% du budget total du NNI sur les PCA concernant les outils et systèmes à l'échelle du nanomètre, les phénomènes et processus fondamentaux et les nanomatériaux (**Figure 11**). En 2013, ces Programmes représentent encore la partie la plus importante du budget du NNI avec 960M$[23].

Les augmentations de budget les plus importantes durant cette période ont toutefois concerné la nanofabrication (+262%) et les questions de santé et d'environnement (+228%)[24]. Ainsi, la troisième évaluation du NNI publiée en 2010, a souligné la nécessité de mettre l'accent sur les retombées économiques plus visibles en priorisant la recherche sur la production les nanomatériaux et sur les questions de santé et d'environnement. Ce rapport a toutefois souligné l'importance de maintenir une recherche fondamentale forte. Les domaines prioritaires alors définis pour les 10 années suivantes sont l'énergie, la santé, l'électronique et la défense nationale.

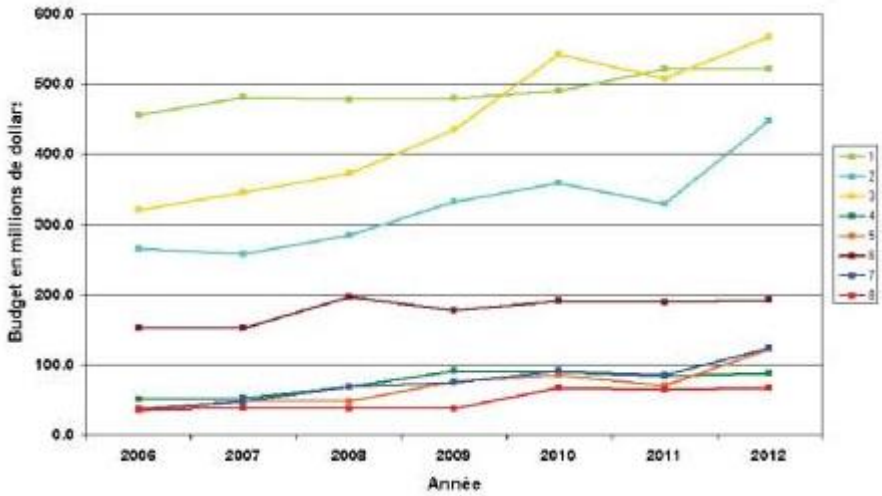


Figure 11 : Evolution du budget des Programmes du NNI (PCa) par année fiscale

1 : Phénomènes et processus fondamentaux ; 2 : nanomatériaux ; 3 : outils et systèmes à l'échelle nano ; 4 : instrumentation, métrologie et standards ; 5 : nanofabrication ; 6 : infrastructures de

[23] Rapport du PCAST (*President's Council of Advisors on Science and Technology*), Avril 2012
[24] *Dix ans de nanotechnologies aux Etats-Unis*, Rapport de l'Ambassade de France aux Etats-Unis, Avril 2011

recherche ; 7 : dimensions sociétales

Source : Dix ans de nanotechnologies aux Etats-Unis, Rapport de l'Ambassade de France aux Etats-Unis, Avril 2011

En 2014, un nouveau plan stratégique est publié, dans lequel cinq nouveaux PCA sont définis[25]. L'objectif de ce nouveau plan est d'accélérer l'innovation dans des domaines de priorité nationale (collecte et conversion de l'énergie solaire, *nanomanufacturing*, nanoélectronique…), éviter au mieux les recouvrements entre les objectifs opérationnels qui doivent être en plus grande cohérence avec les domaines de recherche fédéraux. Dans ce nouveau plan stratégique, la recherche fondamentale, l'instrumentation, les systèmes et dispositifs nano ainsi que l'environnement et la santé restent des champs de recherche priorisés.

Le modèle européen

La Commission Européenne (CE) finance la recherche des pays membres à travers les Programmes-Cadres pour la Recherche et le Développement technologique (PCRD). Lors du 6ème PCRD en 2002, les NST sont affichées pour la première fois comme une des priorités de la CE, priorité reprise lors du 7ème PCRD (période 2007-2013).

Dans son nouveau programme de recherche et d'innovation établi en 2014 avec pour horizon 2020 (programme H2020), la CE a souhaité soutenir les projets tout au long de la chaine de l'innovation et rationnaliser les financements en faveur de la croissance[26]. L'accent est donc mis sur les retombées économiques et sociétales à travers la définition de trois nouvelles priorités non thématiques : l'excellence scientifique, la primauté industrielle, et les défis sociétaux (au nombre de 7). A travers les nouveaux contours du PCRD, les priorités de la CE sont particulièrement orientées vers les projets de recherche appliquée et de transfert technologique c'est-à-dire vers un éventail de projets allant de la validation de la technologie en environnement réel (niveau de maturité technologique, TRL5) à la démonstration du système à l'échelle prototype en environnement opérationnel (TRL7). Les projets de recherche amont apparaissent quant à eux comme une priorité plus secondaire.

Dans ce nouveau programme, les NST ne sont plus affichées comme une priorité en tant que telle comme dans les précédents PCRD mais apparaissent au sein de l'axe « Primauté industrielle » au niveau des technologies clefs génériques (KET) et de la thématique « Nanotechnologies, Matériaux et Production » (NMP). Les principaux thèmes du NMP concernent les nanotechnologies et matériaux avancés pour des soins de santé plus efficaces et les nanotechnologies et matériaux avancés pour des technologies à basse consommation de carbone et pour une efficacité énergétique.

Le modèle français

Le premier programme français ciblé sur les NST a été le Programme National français en Nanosciences créé en 2003 par le Ministère de la Recherche, le CNRS, le CEA et la DGA. Ce programme, visant à soutenir, structurer et développer la recherche fondamentale s'est traduit par le lancement d'appels d'offres annuels et le financement de projets scientifiques, le soutien aux actions de formation, d'animation et de structuration de la communauté scientifique, ainsi que l'aide à la mise en réseau de moyens de technologie national et de proximité. En 2005, l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) rentre le programme PNano

[25] Rapport du PCAST (*President's Council of Advisors on Science and Technology*), Octobre 2014
[26] www.horizon2020.gouv.fr

situant les NST au cœur des priorités de l'agence (devenu ensuite P3N en 2008 puis P2N en 2010), avec un budget alloué de 35M€ (voir fiche variable 3 « *Pilotage de la recherche et de l'innovation* »).

En 2014, les appels à projets par l'ANR se sont alignés sur ceux de l'Europe avec un plan d'actions basé sur un appel à projets structuré 2 composantes : une composante « défis sociétaux », ouverte à un large spectre allant de la recherche fondamentale à la recherche finalisée, et une composante « défi de tous les savoirs » pour soutenir des projets essentiellement de recherche fondamental qui ne se retrouvent pas couverts dans les domaines couverts par les défis sociétaux. Contrairement à l'Europe, ces défis ne sont toutefois pas accompagnés par des appels à projets sur des technologies génériques clefs.

Le modèle chinois[27]

Pour son développement économique et la modernisation du pays, la Chine s'est engagée dans une politique volontariste de développement de la recherche, d'industrialisation et de commercialisation. Dans le pays, les évolutions scientifiques sont d'avantage perçues comme une réponse aux besoins du marché. Ainsi, la recherche chinoise priorise la recherche appliquée, avec un budget total en R&D en augmentation constante et très significative et une innovation qui est le fait d'entreprises à capitaux essentiellement publics.

Le Ministère chinois dédié à la recherche (MOST) définit et met en œuvre les priorités scientifiques à travers différents programmes nationaux. Les gouvernements régionaux s'impliquent dans le développement des activités en R&D localement pertinentes pour adapter les programmes nationaux aux besoins locaux. En 2006, un plan national de soutien à la science et la technologie à long terme (2006-2020) et dans lequel les NST prennent une place prédominante est lancé par le gouvernement chinois. Ainsi, le soutien aux NST a augmenté de presque 300% entre les périodes 2001-2005 et 2006-2020.

La recherche en NST s'articule autour des quatre grandes bases de recherche, qui représentent 80% de la R&D en NST en Chine **(Figure 12).** Ces bases sont localisées sur la côte Est du pays avec au Nord, le « *National Center for Nanoscience and technology* » à Beijing et le « *China National Academy of Nanotechnology & Engineering* » à Tianjin et au Sud le « *Nanopolis Suzhou* » à Suzhou et le « *National Engineering Research Center for Nanotechnology* » à Shanghai. Elles constituent de véritables plateformes de maturation, permettant d'accélérer la mise sur le marché de produits NST issus de la recherche, en rassemblant dans un même lieu géographique, structures d'enseignement, centres de R&D, incubateurs et entreprises de tout type. Dans le foyer Nord, la recherche est principalement axée sur les nanomatériaux (nanotubes de carbone, matériaux liquides nano-magnétiques, semi-conducteurs nano, matériaux nano-composites absorbants, polymères nano-composites, nanomatériaux d'interface, etc.,) tandis qu'une recherche plus spécifique sur la nanobiomédecine est menée dans le foyer Sud.

[27] Bureau du CNRS en Chine

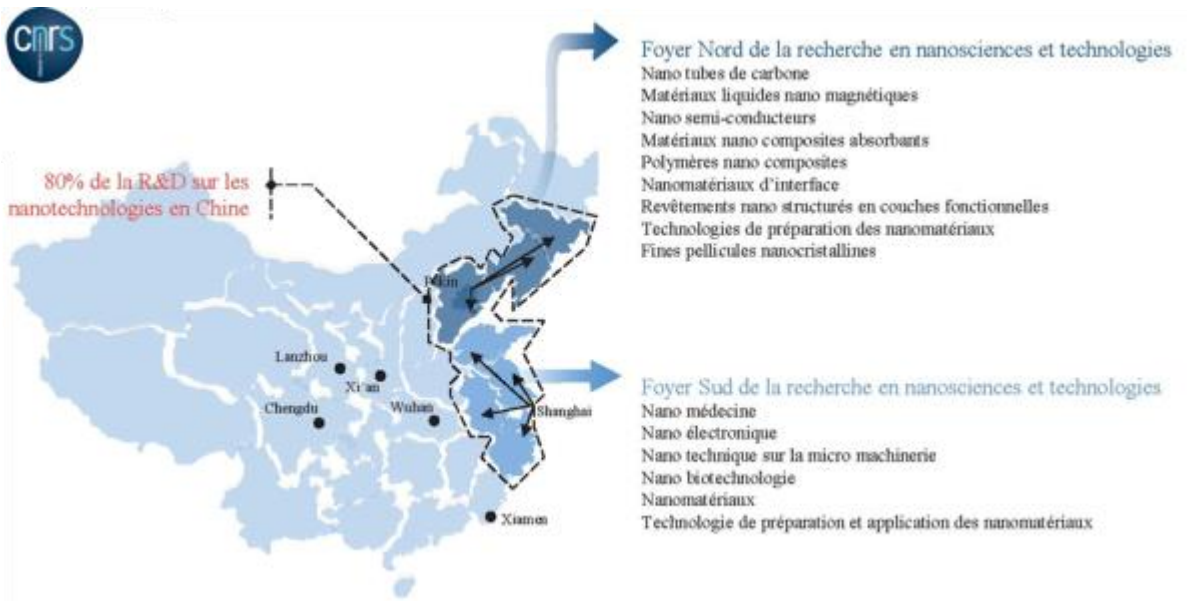


Figure 12 : Répartition régionale de la recherche en NST en Chine
Source : bureau CNRS en Chine

Plus de 400 firmes et 350 universités, une trentaine d'instituts de recherche et 26 000 chercheurs sont impliqués dans le développement des NST en Chine. Parmi les instituts de recherche chinois, le CAS, l'Académie des Sciences de Chine, remplit à la fois une fonction stratégique d'orientation et un rôle d'opérateur de la recherche. Les entreprises chinoises présentant des activités dans les NST sont majoritairement situées au niveau des produits de base dans la chaine de valeurs industrielles.

Des programmes de mobilité et de coopération internationale sont mis en place en Chine afin de faciliter l'apport du savoir-faire acquis à l'étranger sur le territoire, le transfert technologique et scientifique d'encourager les échanges de chercheurs et de partager les bénéfices de futurs brevets. C'est le cas notamment du programme établi avec le laboratoire national de nanotechnologies du Brésil[28].

Le développement des nanotechnologies en Corée du Sud

En Corée du Sud, le NSTC (*National Science and Technology Council*), présidé par le Président de la République, coordonne l'initiative nationale en nanotechnologie depuis décembre 2000. Le budget de cette initiative est globalement croissant entre 2001 (1,052 won) et 2012 (2, 834 won). L'objectif de cette initiative est de passer dans une troisième phase du développement industriel du pays, la priorité étant mise sur les secteurs jugés d'avenir, et notamment de le positionner parmi les trois premiers leaders en NST d'ici 2015. Une réelle stratégie gouvernementale est mise en place pour coordonner de façon intégrée universités, industrie, défense, etc. dans le domaine des NST avec un soutien appuyé au transfert technologique et à la commercialisation de nanoproduits.

Parmi les nombreux programmes de recherche, on distingue les programmes concernant les nanomatériaux, le programme nano convergence 2020 sur la commercialisation et la création de nouvelles

[28] http://www.ambafrance-cn.org/Accord-de-cooperation-sur-les-nanotechnologies-entre-la-Chine-et-le-Bresil

filières industrielles et les programmes R&D sur la convergence des technologies intégrant les NST. En 2011, un plan appelé « *Nano safety* », ayant pour but de définir les méthodes et les processus pour l'identification, la gestion et la minimisation des risques associés aux nanoproduits, a été introduit. Ce plan participe à la prise en compte des aspects de sécurité engendrés par la phase de commercialisation des nanoproduits.

Une politique de décentralisation a été mise en place afin de développer des centres régionaux. Ainsi, la Corée du Sud compte 6 grands centres dédiés aux NST : l'u-ITC (*Ubiquitous IT cluster*), le KPEC (*Korea printed Electronics Center*), le NCNE (*National Center for nanoprocess & Equipment*), le KANC (*Korea Advanced Nanofab Center*), le NNFC (*National nanofab center*), le NCNT (*National Center for nanomaterials Technology*). Les secteurs prioritaires dans lesquels la Corée du Sud investit sont à 33,4% les TIC, à 23,7% les biotechnologies et la biologie et à 15% l'énergie et le transport. En 2013, 41 entreprises présentant des activités dans les NST ont été recensées dans le pays. Au niveau de la chaine de valeurs industrielles, c'est l'approche système qui est privilégiée.

En 2011, la Corée du Sud se situe au 4ème rang dans le top 15 des pôles mondiaux les plus importants au niveau international[29].

Enfin, le pays entretient une politique internationale active lui permettant d'acquérir de nouveaux savoir-faire dans des technologies de pointe. Elle collabore notamment avec la France (mobilité de chercheurs, mise en réseau, projets de recherche sur les TIC), la Chine (météorologie, biotechnologies, environnement, nouveaux matériaux…) et la Grande-Bretagne (6 centres communs depuis 2004).

La montée progressive de la Russie

Après des années 90, marquées par un effondrement total de son économie, la Russie voit le retour d'une croissance économique au début des années 2000. Dans la perspective de retrouver sa place de grande puissance et de renforcer son industrie, les NST sont au cœur de la stratégie de développement du pays et sont coordonnées au plus haut niveau politique.

C'est en 2006 qu'apparaît publiquement l'intérêt pour les NST dans des discours officiels du Président russe. En 2007, la Russie se dote d'une société de fonds d'investissement publique, RUSNANO (*Russian Corporation of Nanotechnology*), qui dépend directement du Président russe et bénéficie de moyens très importants avec un budget alloué de 3,2Md€[8]. Elle a pour objectif de contribuer à la diversification économique du pays en portant la production russe dans le secteur des NST à 3% du marché mondial à l'horizon 2015. RUSNANO est donc utiliser plus comme un outil de politique d'innovation industrielle que de politique scientifique. La part des dépenses industrielles russes est, quant à elle, significativement moins importante que celles des Etats-Unis. Il est à noter que les communications sur les stratégies russes pour le développement des NST et sur les chiffres qui s'y rapportent restent peu nombreuses, peu visibles sur la scène internationale et sont donc difficilement vérifiables.

Les missions de RUSNANO concernent l'aide organisationnelle et le soutien financier des projets de R&D, le soutien financier à la formation de spécialistes mais joue également et avant tout le rôle de société publique de capital-risque pour la création de partenariats entre l'Etat, la science et des investisseurs privés à travers le volet de sélection et financement de projets innovants pouvant déboucher sur des marchés et donc de futures start-up. En finançant des sociétés russes ou étrangères, la Russie offre un environnement complet pour la création d'entreprises dans les NST : infrastructures, certification, évaluation des risques et

[29] *Analyse des risques et des intérêts potentiels associés aux nanotechnologies dans le domaine de la défense et de la* sécurité, Etude Prospective et Stratégique pour la DAS, Mars 2013

commercialisation. C'est en novembre 2012 que la Russie ouvre le premier centre russe des NST dans le parc technologique Idea de Kazan, capitale de la République de Tatarsan. D'autres centres russes étaient alors en voie de création à Moscou, à Saint-Pétersbourg, à Ekaterinbourg, à Doubna, à Zelenograd (Moscou), à Saransk, à Stavropol, à Novossibirsk et à Tomsk. Le fonds des projets d'infrastructure de RUSNANO a retenu ces villes lors d'un appel d'offres spécial. Ces centres sont appelés à commercialiser les résultats des recherches scientifiques.

Traditionnellement, la Russie est spécialisée dans les matériaux innovants, mais a développé les domaines d'applications suivants : électronique, optoélectronique, mémoire magnétiques, instrumentation, croissance cristalline, nanomatériaux, nanostructures semi-conductrices, spintronique, nanomagnétisme et mémoire. Selon une déclaration du Premier Ministre Vladimir Poutine, près de 1000 entreprises sont actives dans le secteur de la nano-industrie en août 2009, mais les données accessibles donnent un chiffre loin du compte. Les domaines du médical et de la mécanique de précision semble être les mieux représentées dans le tissu industriel russe.

La Russie multiplie les collaborations avec les laboratoires étrangers notamment en Europe et en Asie et favorise la coopération technologique en incitant des multinationales à implanter leur activité de R&D en Russie. Depuis 2010, RUSNANO investit en effet dans des entreprises étrangères à fort potentiel pour ensuite permettre la construction d'une usine de production sur le territoire russe. Les domaines dans lesquels il investit sont variés et stratégiques : médical, semi-conducteur, batterie solaire, etc.

Ainsi, la Russie a développé des coopérations technologiques avec de nombreux pays, dont la Chine, la Corée, Taiwan, l'Inde, Israël, le Brésil, Grande-Bretagne, les Etats-Unis, etc. Depuis 2012, RUSNANO s'est rapproché des Etats-Unis pour promouvoir le partenariat entre industriels, investisseurs et fonds privés et de faciliter le marketing des produits russes aux Etats-Unis. Des initiatives similaires ont été créées avec d'autres pays, comme RUSNANO Israël. L'Allemagne serait le premier de ses collaborateurs, les Etats-Unis et la France se positionnent quant à eux en 2ème position et 3ème position avec respectivement 2736 et 1689 publications communes avec la Russie entre 1990 et 2012.

Emergence d'un nouveau leader : l'Inde

L'Inde est marquée par une volonté gouvernementale de développer les NST et les structures de recherche dans le domaine. Dès la fin des années 90, l'Inde a ainsi mis en place trois agences ayant pour mission de promouvoir les NST et leur développement : le département des sciences et technologies (DST) jouant un rôle prédominant, le département de recherche scientifique et industrielle et le département des biotechnologies. En 2001, le DST bénéficie d'un budget de 15 M$ dans le cadre d'une initiative sur les Nanosciences et Technologies dont l'objectif est de positionner l'Inde parmi les acteurs majeurs du domaine au niveau international[29].

En 2007, le gouvernement indien lance une nouvelle initiative appelée « *Nanomission* » accompagnée d'un financement public de 250 M$ sur cinq ans. Une gouvernance tripartite, composée de représentants de l'Etat (DST), des scientifiques et des industriels, est mise en place afin de développer des partenariats stratégiques entre l'industrie et les instituts de recherche. Les objectifs de la *Nanomission* sont : (i) de renforcer la recherche fondamentale et appliquée, (ii) de développer les formations interdisciplinaires, (iii) de construire et mutualiser les infrastructures à travers le pays, (iv) de créer des collaborations avec l'international. Une étude publiée en 2014 dans *Nature Nanotechnology* indique que l'initiative indienne a, depuis 2007, financé 12 unités de nanosciences, 7 centres de Nanotechnologies, 10 unités d'excellence et un centre de recherche computationnelle. Environ 500 compagnies spécialisées dans les NST ont été

identifiées, les secteurs le plus importants étant la chimie et la médecine[30]. Le département d'Electronique et de technologie d'informations se concentre plus particulièrement sur la nanoélectronique et sur la nanoproduction. Dans la chaîne de valeur industrielle, les compagnies iraniennes en NST sont essentiellement des développeurs de produits intermédiaires.

En plus de ce financement gouvernemental, d'autres financements conséquents issus de collaborations avec l'international sont à considérer. Le partenariat RUSNANO notamment rapporte entre 2010 et 2022, 220 millions à la recherche indienne en NST.

Le développement des nanotechnologies en Iran

L'Iran s'est investi dans le développement de ses activités en NST dès le début de 2001. A cet effet, l'*Iran Nanotechnology Initiative* (INI) a été créé en août 2003. Son principal objectif est de faire de l'Iran l'un des 15 premiers pays leaders dans les NST dans le but de stimuler le développement économique en mettant en place une économie de connaissance grâce au développement des NST[31]. Le premier plan national de développement des NST a été introduit en juillet 2005. Ce plan d'actions, prévu de 2005 à 2014, définit la stratégie des activités à court terme (deux ans), moyen terme (cinq ans) et long terme (dix ans). Une des grandes priorités de l'INI concerne le traitement de l'eau ou un programme national axé sur le secteur agricole.

Les actions de l'INIC sont multiples. Elles concernent le développement scientifique des NST, l'intégration des NST dans les filières industrielles, la mise en place de la normalisation, mais aussi les programmes de communication aux différents publics. Une autre priorité de l'INIC est de favoriser la commercialisation des produits issus des NST en soutenant les start-ups, en introduisant les NST dans les activités industrielles et en aidant les entreprises en NST à augmenter leurs part de marché local et international.

L'une des premières lignes directrices de l'INIC est l'excellence scientifique dans le domaine des NST. De 2000 à 2010, l'Iran est passé du 59ème au 14ème rang mondial en ce qui concerne le nombre de publications en NST. A présent la recherche iranienne dans les NST est constituée d'environ 5000 chercheurs. L'INIC a également consolidé les interactions entre les laboratoires du territoire par la mise en place d'un réseau national des laboratoires en NST (INLN). L'INLN permet de mutualiser, à travers le pays, les équipements entre les 44 centres de recherche membre du réseau. Par ailleurs, l'INIC s'est très vite engagé en tant qu'acteur majeur de la normalisation internationale en NST en siégeant dès 2006 dans le comité dédié aux NST de l'organisation internationale de la normalisation (ISO /TC229). L'INIC a donc participé activement aux programmes internationaux de normalisation dans le domaine des NST. En 2006, l'INIC a décidé de construire un centre national dédié à la nanométrologie et au développement de l'instrumentation, ce qui constitue une référence en termes de contrôle qualité et des systèmes de calibration pour les réseaux de laboratoires.

D'un point de vue sociétal, l'INIC a organisé des évènements pour promouvoir les NST auprès de la société civile notamment des enfants (Nanoclub pour les enfants, chapitres sur les nanos au lycée). Certains programmes télé et radio sont spécialisés sur les nanos. Les industriels sont aussi ciblés par l'organisation de workshops, et des newsletters abordant le développement des NST.

Entre 2001 et 2009, l'Iran serait passé du 52ème au 25ème rang international et au premier rang parmi les pays islamiques et ceux du Moyen-Orient, dans la recherche en NST. L'Iran a eu la plus forte croissance avec une moyenne de 80,2% depuis la création des NST.

[30] *Creating growth opportunities for Indian nanoscience & nanotechnology*, Rapport de Bangalore India Nano
[31] http://www.nano.ir (*Iran Nanotechnology Initiative Council),* 2014

Les Financements

Depuis le début des années 2000, les investissements publics et privés en R&D dans les NST sont significativement croissants. Ainsi, selon une étude réalisée par le groupe *Cientifica* en juillet 2011, le cumul mondial des dépenses gouvernementales pour la R&D dans les NST entre 2001 et 2011 s'élèveraient à 67,5 billions de dollars[32,33].

Les financements publics

Leader au niveau des financements publics des NST depuis 2002 en termes absolus, les Etats-Unis maintiennent leur position en 2010 avec un budget de 2,1 Md$, et ce malgré une diminution de budget de 17,3% sur la dernière année. Ce chiffre comprend à la fois les investissements du gouvernement fédéral (1,6 Md$) et ceux des gouvernements d'état américains[23]. Ce sont au total plus de 14 Md$ qui ont été investis par le gouvernement fédéral américain dans le programme NNI entre 2001 et 2011.

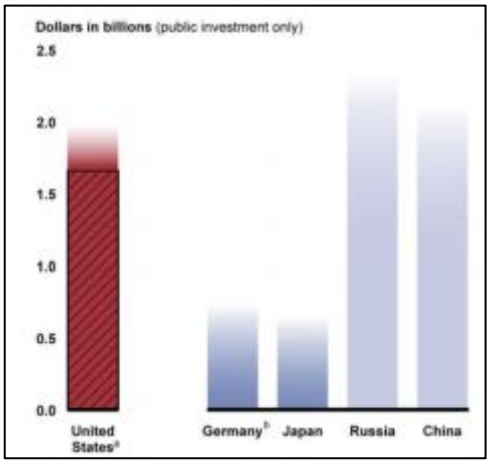
En tenant compte de la parité du pouvoir d'achat (PPA), prenant en compte le coût général de la vie dans les pays considérés, *Cientifica* montre que les Etats-Unis ont temporairement été doublés en 2007 par la Russie, qui a alors fortement investi au moment de la création de RUSNANO avec un budget de plus de 3 Md$ après ajustement PPA, mais également par la Chine selon l'étude menée par *Cientifica* en 2011[32]. Cette même étude prévoit une dépense de 2,25 Md$ par la Chine en 2011 après ajustement PPA (1,3 Md$ en termes de dollars réels) alors que les Etats-Unis prévoyaient un budget en baisse avec un investissement de 2,18 Md$.

D'après *Cientifica,* le Japon aurait, en termes de PPA, perdu sa position de second leader face à la Chine et la Russie entre 2006 et 2007, alors que l'étude menée par le groupe *Lux Research* que mentionne le rapport du PCAST de 2012, positionne toujours le Japon en deuxième position en 2008 et 2009. Selon cette dernière, la Russie aurait dépassé le Japon en 2010 pour se positionner au deuxième rang mondial derrière les Etats-Unis en 2010[23]. Les deux études s'accordent à dire que le premier pays européen à s'imposer dans les rangs mondiaux cette même année est l'Allemagne. Il est à noter que l'investissement public de l'Union Européenne ajouté à celui de plusieurs de ses états membres aurait dépassé l'investissement américain en 2010 en totalisant plus de 2,6Md$[34]. Ces données illustrent bien la politique volontariste de la Chine et de la Russie pour investir dans les NST.

Le rapport du GAO sur les financements publics pour la R&D en NST de différents pays en 2013, paru en janvier 2014, présente en projection la montée de la Russie au premier rang mondial des investissements publics avec plus de 2,2 Md$, devant les Etats-Unis **(Figure 13).** Selon cette étude, la Chine aurait de son côté présenté un budget public en NST équivalent à celui des Etats-Unis. Enfin, l'Allemagne et le Japon auraient des investissements comparables en termes absolus en 2013. Il faut noter l'existence d'incertitudes liées à ces projections du fait notamment des différentes définitions attribuées à la R&D et aux nanotechnologies entre les pays et du manque de transparence pour certains d'entre eux (notamment la Russie).

[32] www.cientifica.com
[33] http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/72827.htm (Service ADIT de la CE)
[34] *Nanotechnology Funding: Corporations Grab the Reins*, A. Xue and D. Hwang, *Lux Research*, Avril 2011

L'importance des budgets publics attribués dans ces pays reflète une volonté marquée de leur part de s'imposer dans les nanotechnologies. Ainsi, le Japon continue à investir de façon massive dans ces nouvelles technologies, et ce, malgré la menace d'une nouvelle crise économique nationale[35].



Projection des investissements pour le gouvernement d'état en 2013. La comparaison avec les autres informations de la figure est quelque peu incertaine

Budget fédéral des Etats-Unis pour l'année fiscale 2013 (résolution continue)

Projection des investissements publics de l'Allemagne et du Japon en 2013. La comparaison avec les autres informations de la figure est quelque peu incertaine.

Projection des investissements publics de la Russie et de la Chine en 2013. La validité de l'ensemble est incertaine (du fait des informations disponibles limitées) comparée aux autres informations illustrées sur la figure.

[a]Les investissements publics des Etats-Unis représentés sur le graphe incluent les investissements publics et l'investissement fédéral pour le budget 2013 (résolution continue) de la NNI. La NNI focalise principalement sur la R&D. Les montants dépensés par les agences et départements de la NNI peuvent varier du budget représenté ici à cause de facteurs tels que la séquestration.

[b]L'investissement public prévu pour l'Allemagne n'inclue pas sa contribution à l'effort de la CE pour la R&D en NST.

Figure 13 : Investissements publics pour la R&D en nanotechnologies en 2013- Comparaison des Etats-Unis avec certains pays leaders
Source : d'après le rapport GAO (Janvier 2014) : « Emergence and implications for U.S Competitiveness, the Environment, and Human Health ».

A l'échelle européenne, le 7ème Programme cadre de recherche et développement technologique (7ème PCRD) a budgété 3475 M€ pour les projets de recherche sur la thématique spécifique « *Nanosciences, nanotechnologies, matériaux et nouvelles technologies de production* » (NMP) entre 2007 et 2013[36]. En 2014, ce champ thématique a bénéficié de 474,7 M€ au sein du 8ème PCRD intitulé Horizon 2020[26].

Les investissements privés

On entend par investissements privés deux types d'investissements : le financement par les entreprises et le capital-risque.

En 2010, les Etats-Unis (3,4 Md$) et le Japon (2,8 Md$) dominent en ce qui concerne la part d'investissement des entreprises dans la R&D en NST[22] **(Figure 14)**. Ces investissements sont primordiaux puisqu'ils représentent la plus grande part des investissements en NST dans ces deux pays. D'un point de vue général, le montant des financements des entreprises dans les NST est faible comparé à leur investissement pour les marchés matures[37].

[35] *Le déploiement industriel des nanotechnologies et de la biologie de synthèse sur les territoires précurseur des manufactures du futur*, Rapport interministériel français, Décembre 2013
[36] www.veillenano.fr
[37] *Symposium on assessing the economic impact of nanotechnology*. OCDE, NNI, Mars 2012

En France, l'investissement des entreprises en NST est faible en contraste avec un financement public honorable. Selon le rapport interministériel français de 2013[35], cette frilosité s'expliquerait par un manque de confiance des investisseurs après le débat public de 2009 sur les risques des nanomatériaux et sur la pérennité du crédit impôt recherche[24]. L'Allemagne, quant à elle, se distingue de la France par une implication forte (70%) du secteur privé.

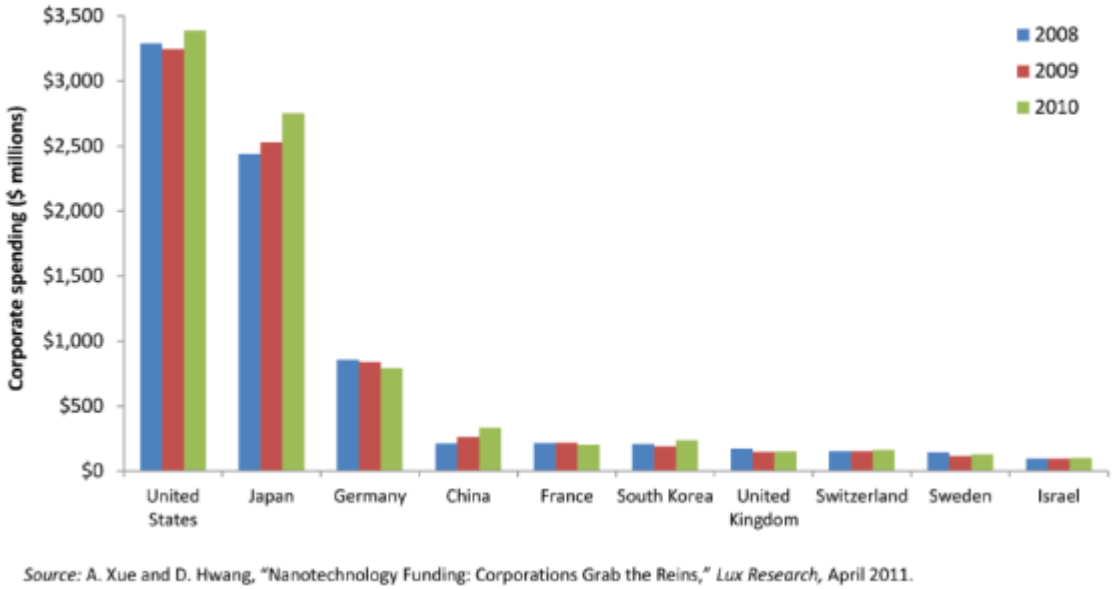


Figure 14 : Dépenses des entreprises en nanotechnologies entre 2008 et 2010

Source : Rapport PCAST (Avril 2011), Report to the President and Congress on the fourth assessment of the National Nanotechnology Initiative

En termes de capital risque, les Etats-Unis dominent encore en 2010, l'Allemagne et la France se situant respectivement au 3ème et 4ème rang mondial loin derrière le leader américain[22]. Toutefois, le capital-risque ne représentant que 4% de tous les financements en NST à l'échelle mondiale, l'impact de cet apport financier reste limité.

Innovations scientifiques et transferts technologiques

Les publications scientifiques constituent un des indicateurs de l'activité scientifique et de ses résultats. De 2009 à 2010, l'Europe a publié significativement plus d'études scientifiques que les américains et la Chine[23]**.** L'Académie des Sciences de Chine (CAS) est le pôle chinois qui a publié le plus d'articles au monde (16476 articles) entre 1985 et 2009, devant les Etats-Unis (12194 articles). Le CNRS, quant à lui, était alors en 4ème position. Selon le rapport du PCAST américain de 2014, les Etats-Unis, l'Union Européenne et la Chine ont produits le plus grand nombre d'articles scientifiques sur les NST chaque année entre 2011 et 2014[25].

Jusqu'en 2011, les Etats-Unis étaient leaders pour les publications scientifiques. On observe à présent une explosion du nombre de publications provenant des puissances émergentes : l'Inde et la Chine ayant multiplié par 20 et 17 leur nombre de publications en 2013 par rapport à 2001. Ainsi, d'après *Web of sciences*, la Chine se place, depuis 2013, au 1er rang du nombre de publications scientifiques en NST devant les Etats-Unis **(Figure 15)**.

En ce qui concerne la Corée du Sud, la performance en termes de production scientifique reste croissante. En 2000, la Corée du Sud est placée au 9ème rang mondial avec 513 publications sur les NST[38]. En 2012, elle en produit 6880 ce qui la positionne entre le 3ème et le 4ème rang mondial selon la source utilisée. De manière surprenante, le facteur h tend à diminuer depuis 2006.

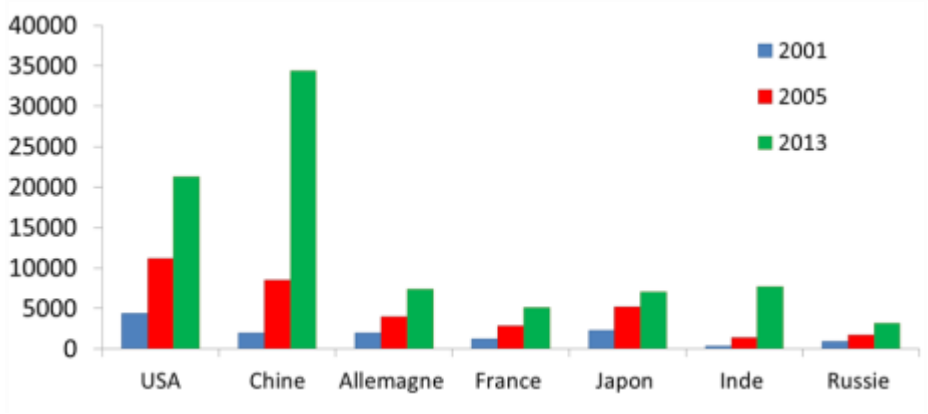


Figure 15 : Nombre de publications en NST de 2001 à 2013
Source : d'après Web of Sciences

En termes de facteur h, Les Etats-Unis s'imposent pour les articles scientifiques en NST publiés pendant la période 2001-2013, ce qui témoigne de l'impact des publications américaines au sein de la communauté scientifique internationale[39]**.** Cette tendance est toutefois fortement en train de se resserrer **(Figure 16)**.

Concernant les brevets, la Chine est devenue leader en termes du nombre de dépôt de brevets devant les Etats-Unis, pendant la période 2005-2009. En 2010, c'est dans les secteurs de l'électricité et de la physique que la Chine a publié le plus grand nombre de brevets en NST par rapport au reste du monde **(Figure 17).** Toutefois, la même année, les Etats-Unis restent leaders concernant le nombre de brevets prioritaires ce qui illustre leur capacité à être précurseurs pour le développement de nouveaux concepts technologiques ou fondamentaux. En 2012, la Chine est passée au 3ème rang mondial pour le dépôt de brevets derrière les Etats-Unis et le Japon[27] **(Figure 18)**.

[38] *Direction for Nano & Convergence Technology of National Research Foundation of Korea* (NRF)
[39] www.statnano.com

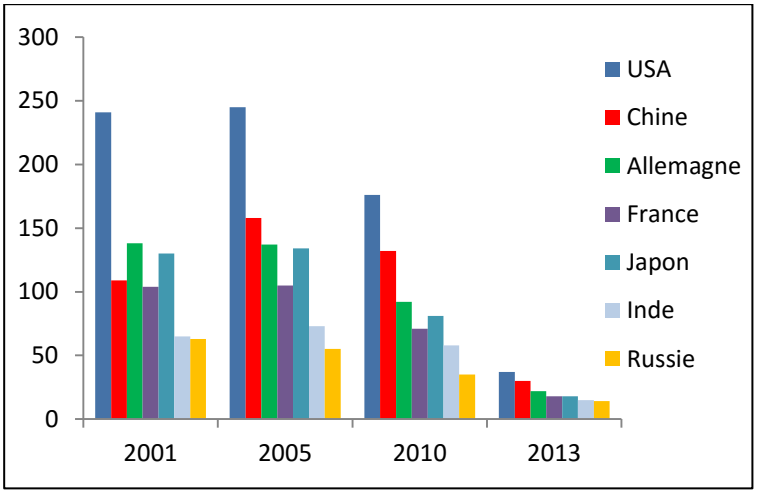


Figure 16 : Comparaison du facteur h des articles publiés entre 2001 et 2013

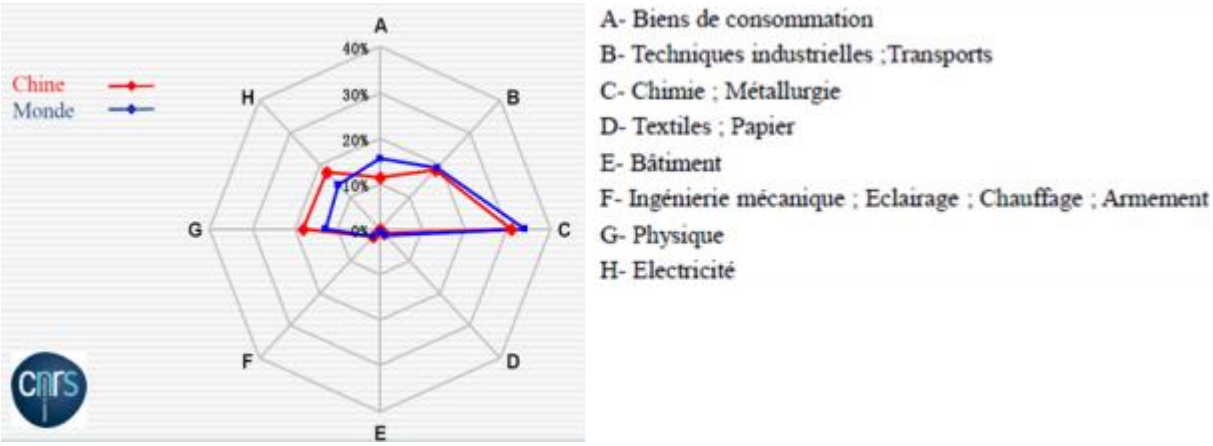


Figure 17 : Comparaison de la Chine avec le reste du monde sur les domaines d'obtention de brevets en NST
Source : bureau CNRS en Chine

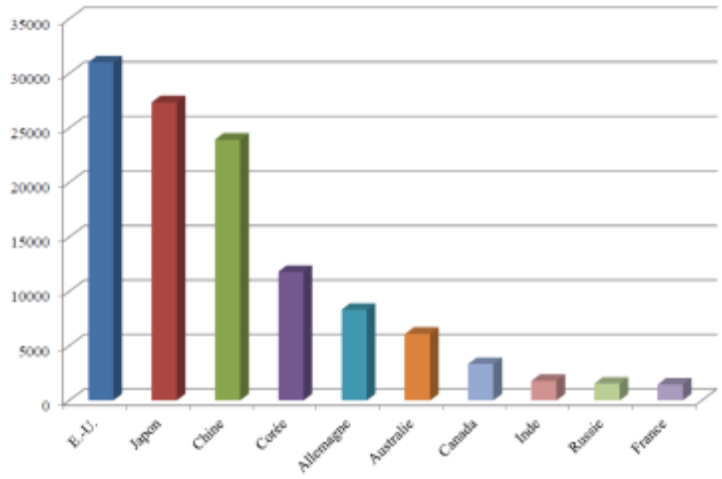


Figure 18 : TOP 10 des pays pour le dépôt de brevets prioritaires en 2012
Source : d'après les données de www.statnano.com

Déploiement industriel et production de nanomatériaux

L'inventaire fourni par le projet PEN (*Project on Emerging Nanotechnologies)* du *Woodrow Wilson Institute*, a recensé 1628 produits sur le marché mondial en octobre 2013 dont 440 au niveau européen. Selon le rapport interministériel français de 2013[35], la production mondiale de nanomatériaux a été en outre multipliée par dix entre 2002 et 2011, passant à plus de 270 000 Tonnes en 2011. Une estimation conservatrice pour 2016 est d'environ 400 000 tonnes[23]. Selon les projections réalisées lors d'une étude menée par *Lux Research* et publiées dans le rapport du PCAST américain de 2014, le montant des recettes de la commercialisation de produits NST prédit en Europe serait légèrement supérieur à celui des Etats-Unis en 2015, correspondant à plus de 20 billions de dollars **(Figure 19).**

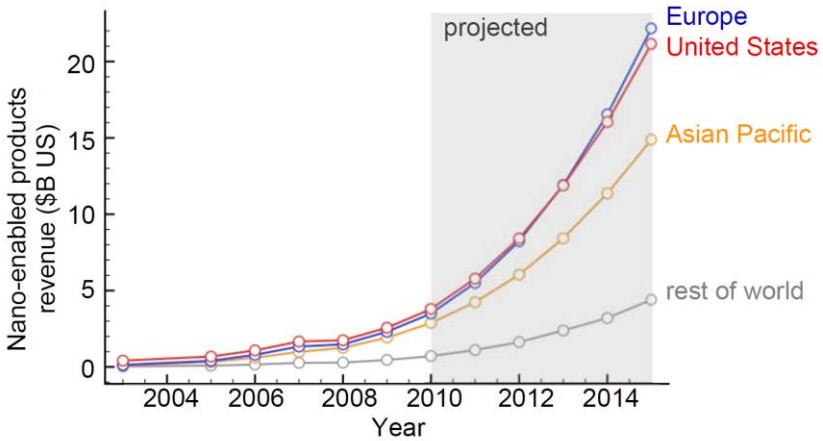


Figure 19 : Comparaison des recettes liées au marché de produits NST dans différentes régions du monde pour la période 2003-2009 avec une projection pour la période 2010-2014

Source : Rapport du PCAST de 2014, d'après des données de Lux Research

Le déploiement industriel se répartit entre de nombreux domaines d'application : la nanoélectronique, le domaine de l'énergie, l'aéronautique, l'alimentation, l'environnement, la santé, et la cosmétique. En termes de création d'entreprises, plus de la moitié est positionnée aux Etats-Unis, dont 50 % au moins sont des start-up[40]. L'Allemagne quant à elle aurait eu 985 firmes en 2011, dont 80% de PME[41]. Il est à noter que le déploiement industriel en NST est encore compliqué à définir en raison des faibles éléments de cartographies et d'études sectorielles. Actuellement, les recensements sont pour la plupart élaborés à partir de déclarations des industriels ou d'hypothèses sur la composition des produits.

Prospective

Tendances lourdes

Multiplication des clusters en NST dans le monde

Au début des années 2000, les Etats-Unis se placent au premier rang mondial dans le développement des NST grâce aux financements importants des programmes lancés par le NNI. Depuis 2005, les investissements publics pour le développement des NST sont croissants et volumineux dans toutes les puissances économiques stables (Etats-Unis, Japon, Allemagne…) mais aussi dans les puissances émergentes (Chine, Corée du Sud, Russie, Inde). Certains pays à tradition agraire et artisanale, qui n'avaient pas connu la révolution industrielle, ont à présent une forte politique d'industrialisation, et des politiques publiques renforçant le développement des nouvelles technologies telles que les NST. Ainsi, de nouveaux acteurs sont rentrés dans la course aux NT, tels que la Malaisie et l'Iran. A présent, il est admis qu'il existe une tendance à une multipolarité des leaders dans le développement des NST.

Certains clusters ont développé des avantages compétitifs dans leurs modèles d'innovation

En Asie, certains pôles comme la Chine, Singapour ou Taiwan ont mis en place des plateformes de maturation attirant les scientifiques du monde entier pour faciliter le transfert technologique et enrichir le niveau de connaissances en NST. Tandis que les pays européens souffrent de la fuite des cerveaux, la Chine en particulier bénéficie du *brain gain*. Ces plateformes permettent d'intégrer rapidement des compétences pluridisciplinaires, et favorisent la maitrise de la fusion des données des NST. Le leadership de ces pôles repose ainsi sur leur capacité à mettre en place des processus et procédés industriels intégrant les NST. Les nanotechnologies sont exploitées pour leur transversalité et sont utilisées comme des plateformes de technologie à part entière dans les clusters asiatiques.

Ces clusters ont parallèlement développé des programmes de prise en charge des risques ce qui leur permet d'avancer sur le développement de ces technologies. Ce mode de fonctionnement est un avantage compétitif par rapport aux pôles européens, qui doivent se conformer au principe de précaution.

Des collaborations entre pays européens et asiatiques sont par ailleurs en cours pour renforcer la coopération internationale sur les programmes en R&D. L'ANR et la Fondation nationale de la recherche de

[40] CNC, 2010
[41] Rapport DGCIS, Octobre 2011

Singapour ont par exemple signé un accord pour lancer un appel à projet concernant les NST et les nanosytèmes en Mai 2014.

Influence des lignes de forces sur les politiques locales de développement des technologies émergentes (incluant les NST)

Certains facteurs internes et externes influencent l'émergence des centres R&D des nouvelles technologies dans le monde. Les relations diplomatiques peuvent ainsi modifier le paysage des pôles de technologies émergentes. L'embargo en Iran a indirectement contraint le pays à devenir indépendant en matière de production, l'incitant à construire une politique nationale d'industrialisation et de recherche et développement. L'Iran affiche désormais son objectif de devenir leader en technologies émergentes dans la région du Moyen-Orient, dans les dix prochaines années. Le développement des nouvelles technologies constitue donc un atout stratégique pour s'imposer sur la scène internationale.

D'autres facteurs internes comme la démographie peuvent également avoir un impact significatif. L'élaboration d'essais cliniques est plus facile en Inde et en Chine en raison de la masse de la population mais également de la réglementation locale moins stricte que dans les pays occidentaux. De plus, les recherches sur les maladies dites orphelines est plus difficile dans les pays à démographie modérée, le nombre de patients y étant plus limité. Ce contexte est particulièrement favorable à l'essor de la nano-médecine et des nano-biotechnologies dans les pôles asiatiques.

Le développement des centres de R&D suit principalement l'évolution des marchés et de la demande. Là encore, la démographique de l'Inde et de la Chine constitue un atout en termes de part de marché, favorisant la mise de place de centres R&D pour répondre à la demande. Les coûts salariaux ne sont donc pas le premier argument dans l'installation des infrastructures de recherche et de production en NST.

Les flux migratoires des diasporas scientifiques en particulier chinoises et indiennes, impactent également sur le développement des centres R&D dans le pays natif des scientifiques. Les échanges migratoires des scientifiques entre la Chine et les Etats-Unis seraient les plus nombreux permettant d'engendrer des relations bilatérales plus structurées, et plus dynamiques en faveur du développement des technologies émergentes dans ces deux pays.

Incertitudes majeures

Stratégies d'innovation des leaders et visibilité des plans d'actions

Bien que l'objectif affiché des leaders soit de maintenir leur position et de s'imposer parmi leurs concurrents, les stratégies choisies par les différents acteurs ne sont pas similaires. Les Etats-Unis ont adopté depuis 2000 une stratégie « long terme » consistant à financer en priorité les programmes de recherche fondamentale et appliquée. Cependant, il est à noter que le plan stratégique du NNI 2015 inclut de nouveaux axes de financements associés à des objectifs sociétaux et des objectifs d'innovations et de commercialisation. De son côté, la Commission Européenne a adopté une stratégie « court terme » orientée sur des projets déjà matures, qui concernent les défis sociétaux tels que la santé, le changement climatique, et l'énergie. De façon générale, les stratégies des Etats-Unis et de la Commission Européenne sur les programmes en NST sont largement visibles grâce à des communications officielles bien diffusées, qui ont pour but d'annoncer les avancées et les nouveaux plans d'actions. En revanche, les autres pôles en NST tels que la Chine et la Russie ont renforcé leurs politiques publiques en faveur du développement des nouvelles technologies mais leurs stratégies sont peu visibles sur la scène internationale.

Corrélation entre le montant des financements et les performances en termes d'innovation

L'évolution du niveau de financement ne traduit pas forcément les dynamiques de performance en termes d'innovation dans les pôles leaders. L'Inde a en effet pu multiplier son nombre de publications en NST par 20 entre 2001 et 2013, atteignant un chiffre comparable en nombre absolue de publications en NST à la position du Japon en 2013. Or, les financements indiens pour cette période sont significativement inférieurs aux financements des initiatives japonaises en NST.
Par ailleurs, la montée en puissance dès 2010 des financements publics russes en NST n'a pas été associée à une évolution rapide du nombre de publications dans le domaine entre 2010 et 2013 selon les données de *Web of Sciences*. Il faut cependant noter que les publications russes manquent de visibilité dans les bases de données scientifiques internationales car elles sont encore majoritairement écrites en russe.

La pérennité des investissements industriels

Les financements publics ont constitué un accélérateur du développement dans les différents clusters d'innovation de NST. On observe cependant des dynamiques différentes selon les pays en termes de financements industriels. Les Etats-Unis et le Japon présentent un fort investissement industriel,. En Europe, l'investissement des industriel reste modéré voir faible dans certains pays tels que la France, ce qui traduit le manque de confiance des industriels sur les marché européens, et la perception négative des industriels face au principe de précaution.

Influence des cultures locales sur le développement de programmes/technologies pour le bien-être humain

Impulsion positive de l'économie circulaire sur les pôles d'innovation

La Chine a été la première à faire entrer en vigueur une loi pour la promotion de l'économie circulaire en janvier 2009[42]. L'objectif de cette loi est de transformer les déchets en ressources et de créer des politiques publiques favorisant la protection et le développement global des écosystèmes. Les retombées écologiques de l'économie circulaire devraient avoir un effet positif en termes de facteur 4, définissant les objectifs de réduction des gaz à effet de serres des différents pays. Pour amplifier l'envergure de cette loi, la Chine a prévu d'intégrer le concept d'économie circulaire au développement de son industrie. Ces stratégies politiques ont permis la mise en place de dispositifs d'incitations en matière d'investissement, de fiscalité, pour créer des effets leviers sur l'accès au marché[41] et pour la mise en place de clusters d'excellence industrielle en R&D.

Développement de l'innovation inclusive en Asie

L'innovation inclusive permet de réduire les inégalités sociales en ouvrant l'accès à l'innovation à l'ensemble de la société civile. La croissance inclusive, qui est un concept économique récent, se développe particulièrement en Asie. De nombreux programmes d'innovation inclusive sont mis en place notamment en Chine, soutenus par une collaboration étroite entre décideurs publics, industriels et acteurs de la société civile (ONG, Association).

[42] *Commentaires et traduction de la circulaire n°1720 relative à la création et de la construction des villes (districts) pilotes pour l'économie circulaire en Chine*. Jean-Claude Levy, Vincent Aurez, Xin Wang, 2013

Développement des initiatives Open-Science

Les programmes d'*Open-Science,* dont le principe repose sur la libre diffusion des savoirs, ont pour but de faciliter et d'enrichir les collaborations entre experts et chercheurs. Les Etats-Unis sont en avance avec des initiatives de mise en ligne de travaux de recherche. Cela aussi permettrait d'accéder plus rapidement aux publications les plus récentes, et de réduire la dépendance aux abonnements des journaux scientifiques.

Hypothèses prospectives

Hypothèse 1 : Prédominance de l'axe Asie-US caractérisée par des dynamiques plus structurées entre les deux pays.

Hypothèse 2 : L'Europe adopte et réussit une politique coordonnée volontariste orientée vers une structuration multi-pôles sur une base open-science et vers les échanges science-société notamment d'économie circulaire, d'innovations inclusives, facteur /4 (intégrant les « intérêts » chinois et américains).

Hypothèse 3 : Certains pôles disparaissent de la compétition mondiale par des choix politiques (moratoires...)

VARIABLE V2 : « DEMANDE ET MARCHES DES NANOSCIENCES ET NANOTECHNOLOGIES A L'INTERNATIONAL »

Rédacteurs : Françoise HENRIO (CEA), Thierry BILLON (CEA), Olivier PEYRET (CEA)
Avec la participation de : Elodie THACHIL (CNRS- C'Nano)

Définition de la variable et indicateurs

Cette fiche traite de du marché des nanosciences et nanotechnologies (NST), de son évolution et de l'évaluation de la demande du marché au niveau international.
Ces quinze dernières années, le développement des NST a connu un rythme de croissance soutenu aussi bien dans les pays développés que dans les pays émergents. Cette croissance s'explique par de récentes percées dans des domaines d'application très différents comme la microélectronique, les énergies alternatives ou encore la médecine. Pour autant, les NST ont été identifiées comme des technologies dont la croissance reste inachevée en regard de la demande marché (*market pull*) et de la volonté des Etats d'innover (*techno push*)[43].

Les indicateurs pertinents identifiés pour suivre l'évolution de cette variable sont les suivants :

- le chiffre d'affaires, la marge brute, le retour sur investissement (*Return on investment*, ROI), par pays et par domaine d'application ;
- le pourcentage du Produit Intérieur Brut (PIB) attribué au développement et à la commercialisation des NST ;
- le rapport du chiffre d'affaire développé par ou grâce aux NST sur le chiffre d'affaire global par domaine d'application ;
- une mesure d'impact « technologique » par pays : transfert technologique, industrialisation et commercialisation ;
- une cartographie des demandes marchés et sociétales en fonction des performances technologiques développées.

Rétrospective

Selon le rapport de synthèse édité par l'OCDE et le NNI suite au « *Symposium on assessing the economic impact of nanotechnology* » en Mars 2012, plusieurs phases peuvent être identifiées dans le développement des produits, solutions ou procédés utilisant des NST :

- Une première génération de 2000 à 2005 : des nanostructures passives
- Une seconde génération de 2005 à 2010 : des nanostructures actives
- Une troisième génération de 2010 à 2015 : des nano systèmes
- Une quatrième génération de 2015 à 20.. : des nano systèmes moléculaires

Ceci avec deux approches distinctes et complémentaires appelées *top down* et *bottom up* suivant le mode de conception de ces nanostructures ou de ces nanosystèmes.

[43] *A European strategy for Key Enabling Technologies - A bridge to growth and jobs*, EC Report, June 2012

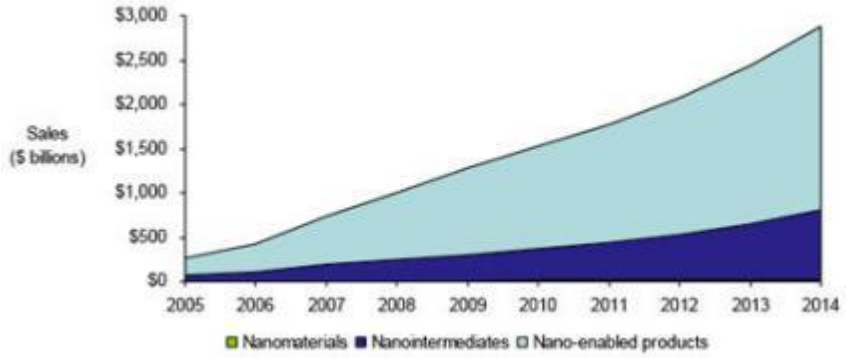
La demande

La demande est identifiable et présente. Elle est adossée à des secteurs industriels clefs, répondant à des enjeux sociétaux. La Commission Européenne (CE) a d'ailleurs identifiée les NST comme une des technologies clefs du futur (*Key Enabling Technologies*, KET)[22]. **Ces nouvelles technologies peuvent** en effet apporter une réponse aux défis de demain, tels que :

- l'augmentation et le vieillissement de la population avec plus de 9 Milliards de personnes estimés pour 2050 ;
- l'urbanisation : en 2025, 85% de la population vivra dans les pays en développement et 60% dans les villes contre 30% en 1958 ;
- les enjeux environnementaux : en 2050, l'équivalent de la ressource de deux planètes sera nécessaire pour faire face à notre consommation ;
- la raréfaction des ressources naturelles : l'indium, le platine, l'étain ou encore l'argent sont désormais des métaux rares ;
- l'augmentation des échanges : en 50 ans, les échanges mondiaux ont été multipliés par 17
- l'augmentation du traitement et du stockage de l'information ;
- le renforcement de la sécurité des biens et des personnes.

Le marché

Selon plusieurs sources, le marché global des NST avoisinerait les 1500 Md$ et, si on y inclut les semi-conducteurs, près de 3000 Md$[44,45] (**Figure 19**).



***F*igure 19 : Chiffre d'affaire développé entre 2005-2014**

Source : Lux Research Report «Sizing Nanotechnology's Value Chain »

Ces estimations ont été réalisées en tenant compte de chiffres d'affaires liés soit à la vente de produits manufacturés, de produits finis ou semi-finis, de matériaux pouvant contenir des nanoparticules en quantité plus ou moins importante. Le chiffre d'affaires lié aux outils de caractérisation n'apparait pas.

Les domaines applicatifs

L'étendue des applications des NST est vaste. Ces nouvelles technologies jouent sur une large palette de propriétés telles que les propriétés catalytiques, électriques, mécaniques, magnétiques, optiques,

---

[44] *Lux Research*

[45] Rapports de la *National Science Foundation*

rhéologiques ou encore stériques et biologiques. Elles apportent de nouvelles fonctionnalités et engendre l'émergence de nouveaux produits/solutions/systèmes.
Les marchés potentiels sont donc eux aussi très nombreux. On n'en citera que quelques-uns : l'industrie électronique, la construction (ciment, peinture, papier, etc.), le transport (automobile et aéronautique), l'énergie, les biens de grande consommation, les textiles, les cosmétiques, l'alimentaire ou encore les applications liées au domaine de la santé. Le secteur de la chimie et des matériaux est lui aussi fortement concerné et travaille par interconnexion avec la majorité de ces marchés en développant des produits de base, des produits intermédiaires, semi finis ou finis[46].
La segmentation marché peut se définir en quatre segments : l'électronique, l'environnement et l'énergie, les matériaux et biens manufacturés, la santé (**Figure 20**).

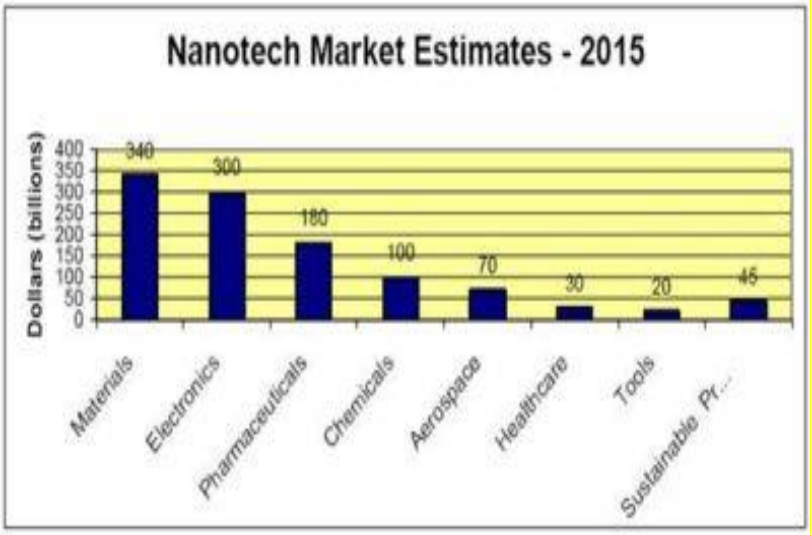


Figure 20 : Estimation du marché en NST- 2015
Source : Sizing Nanotechnology's Value Chain, Lux Research Report

Selon le cabinet *Lux Research*, les marchés des matériaux et de l'électronique sont ceux qui développent le chiffre d'affaires le plus important et représentent plus de 50% du chiffre d'affaires global. En 2015, le marché des nanomatériaux devrait atteindre 340 Md$ et celui de la nanoélectronique 300 Md$. Le marché de la santé est non négligeable, ceux de l'énergie et de l'environnement restent encore balbutiants.

Notons également que le marché ayant montré une progression significative et conforme aux projections est celui des instruments et des outils liés au secteur des NST (instrument de caractérisation, etc.). Entre 2006 et 2011, ce marché a progressé d'environ 42%, soit une croissance qui avoisine les 8-9% par an[47].

On peut citer quelques exemples d'applications dans les produits manufacturés : l'intégration de nanoparticules dans des matériaux (caoutchoucs, plastiques, composites, latex, etc.), l'amélioration des propriétés mécaniques (modules, résistance à la traction, aux chocs, au déchirement, etc.), de la perméabilité, etc. Ces matériaux peuvent être destinés au secteur de l'automobile, de l'aéronautique ou encore du papier ou du *packaging*.

[46] *Industrial application of nanomaterials-VDI Technologiezentrum GmbH,* Rapport EC, 2004

[47] *Lux Research*, 2011

Les nanoparticules sont également utilisées pour leurs propriétés optiques et/ou « anti-UV » dans le secteur de la cosmétique, du papier, de la peinture, dans les textiles pour les propriétés antistatiques, optiques ou encore stabilisantes. Dans l'alimentaire, les NST peuvent apporter des propriétés rhéologiques ou être utilisées comme des systèmes supports.

Enfin, dans l'énergie ou dans le domaine de l'environnement, les nanoparticules peuvent être utilisées dans le photovoltaïque, ou pour développer des propriétés antifongiques, antibactériennes ou encore des propriétés photocatalytiques pour les filtres et membranes de filtration.
En nanomédecine, on retrouvera les nanoparticules dans la délivrance contrôlée de principes actifs, dans le développement de nano capteurs, etc.

La répartition par zone géographique

Le marché et la demande concernant les NST diffèrent selon les zones géographiques. Les Etats-Unis ont été le pays le plus moteur avec une activité intensive qui se concrétise par des nombreux dépôts de brevets comparativement à d'autres pays (voir fiche variable 1 « *Pôles de R&D et de production mondiaux* »). Un groupe de pays comprenant le Japon, l'Allemagne, la France et le Canada sont également très actifs dans ce domaine.
La Chine, la Corée du Sud et l'Inde viendront perturber ce tableau dans un proche futur, forts de leurs politiques volontaristes pour développer les NST. En effet, pour les pays émergents, l'utilité des NST est évidente sur des secteurs prioritaires pour leur développement comme la production et la distribution de l'énergie, le traitement de l'eau. La Chine reposerait sur un développement systématique de l'étude des nanomatériaux et de leurs applications potentielles (*techno push*), l'Inde serait plutôt orientée par la demande (*market pull*), en développant les NST sur des applications comme le traitement de l'eau[48].
Dans les pays développés, l'enjeu est un peu différent, les NST ayant un rôle dans le développement des énergies renouvelables, le traitement de l'eau mais aussi des déchets. Les NST y ont également un développement important dans le secteur du bien-être, du médical ou encore dans celui de la microélectronique.

Une étude datant de 2009 a établi une grille de lecture pour comparer la compétitivité des différents pays dans le domaine des NST. Deux paramètres ont été considérés :

- leur niveau d'activité dans les NST : les critères pris en compte sont le montant des fonds publics et privés, le capital-risque, le nombre de publications et de brevets.
- leur capacité à développer leur économie à travers ces technologies : les critères pris en compte sont la capacité de production, la production, les infrastructures, la qualification du personnel, la propriété intellectuelle.

Cette approche met en évidence la capacité de certains pays à transformer l'investissement dans les NST dans l'économie réelle, le marché. Parmi les mieux placés pour réaliser ce transfert technologique : le Japon, la Corée du Sud, l'Allemagne (**Figure 21**). Les États-Unis et la France ont des positions de challengers. La Chine fait une entrée remarquée dans ce groupe alors qu'elle n'était encore que dans la catégorie des « suiveurs » en 2005.

[48] *India versus China in Nanotech all over in the first round?,* Cientifica Applied Advanced Materials, 2012.

Cette étude rejoint celle menée par le cabinet *Cientifica*. A financement équivalent, l'impact des NST diffèrerait d'un pays à l'autre. Cette approche prend en compte la capacité d'un pays à développer une nouvelle technologie du point de vue scientifique, d'assurer son transfert technologique et son industrialisation (*Nanotech Impact factor*).

Table : The position of global competitiveness of countries in nanotechnology in 2009

The competitive position of countries in nanotechnologies	Global competitiveness index
leaders	
Japan	8
Germany	7
South Korea	19
Taiwan	12
challengers	
The USA	2
GB	13
France	16
China	29
nichers	
Israel	27
Singapore	3
Switzerland	1
Sweden	4
followers	
Canada	9
Australia	15
India	49
Russia	63
The Netherlands	10
Italy	48
Brazil	56

Source: Schwab, 2009, WEF

Figure 21 : Position de la compétitivité des pays dans les NST en 2009
Source : « Position of the countries in nanotechnology and global competitiveness » - Journal for theory and practice management – 2013

Prospective

Le marché des NST est et restera un marché en croissance

Pour les dix prochaines années, cette croissance reste affichée dans toutes les études publiées sur ce thème et dans tous les scénarii évoqués par les industriels lors de nos récentes interviews (**Figures 22 et 23**).

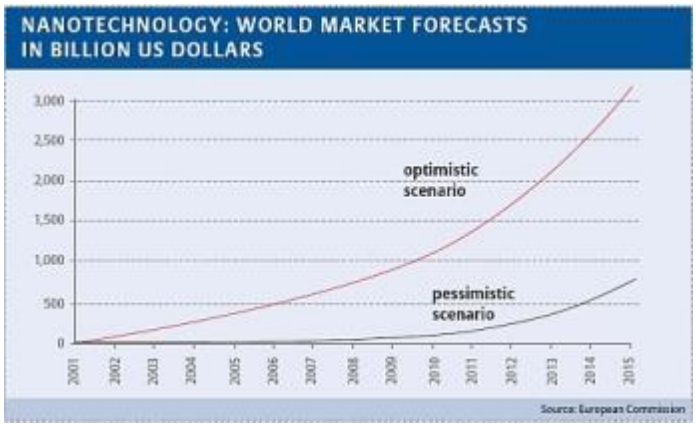


Figure 22 : Prévision du marché mondial en milliards de dollars US.
Source : « Position of the countries in nanotechnology and global competitiveness » - Journal for theory and practice management – 2013

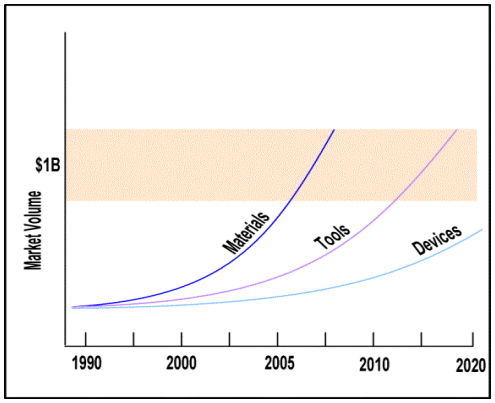


Figure 23 : Estimation de la taille du marché des NST en Milliards de US $.
Source : Nanomaterials Company Report – 2012
http://www.nanomaterialscompany.com/

Selon *BBC Research*, le marché global des NST aurait un taux de croissance annuel sur cinq ans de l'ordre de 15% par an. Par exemple, au Japon, pays historiquement moteur dans le développement des NST, les prévisions réalisées montrent un taux de croissance de 10% par an sur le marché domestique Japonais pour atteindre en 2030 un chiffre d'affaire de 263 Md$[49].

La croissance des NST dans les prochaines années peut s'appuyer sur une demande importante liée à de fortes attentes sociétales mais aussi à la prise en compte d'un contexte international géopolitique complexe (indépendance énergétique, intérêts stratégiques et géopolitiques). En effet, les NST sont des technologies qui doivent contribuer à la croissance verte et au développement durable de nos sociétés. Ces technologies sont porteuses de projets à la fois profitables et durables. Ces notions sont largement partagées au niveau des pays de l'OCDE, des indicateurs ont été créés ou le seront pour mesurer l'impact des NST sur la croissance verte[50]. D'ailleurs, cinq technologies clefs génériques (*KET*) ont été identifiées en lien avec le programme global lié aux NST : les biotechnologies, les nanomatériaux, la micro- et nano-électronique et les nanotechnologies.

[49] NEDO
[50] *The OECD-WPN and the assessment of the economic impact of nanotechnology*- F. Roure – Mars 2012

Le facteur géographique

Les projections des économistes convergent sur le fait que dans les prochaines décennies, le poids des pays émergents en particulier celui de la Chine, la Corée du Sud, et l'Inde dans l'économie mondiale va augmenter au détriment des autres pays[51].

Selon le rapport de l'OCDE de 2013 sur les perspectives économiques mondiales, l'Asie devrait représenter 50% du produit intérieur brut mondial. Cette tendance devrait se retrouver au niveau du marché des NST.
Le rapport de 2013 « *Un principe et sept ambitions pour l'innovation* » mentionne également que les économies dites émergentes comme la Chine ou l'Inde auront une place majeure d'ici dix ans. Ce rapport confirme qu'à elle seule, l'Asie devrait représenter 50% du produit intérieur brut mondial d'ici dix ans. L'Afrique montre également une forte croissance de plus de 5% par an depuis plusieurs années.

Sauf bouleversements majeurs, les pays émergents seront toujours selon ce rapport des investisseurs (fond souverains), des consommateurs et surtout également des innovateurs avec notamment une population d'ingénieurs et de créateurs en expansion. Le contexte d'innovation sera ainsi plus compétitif. Le secteur des NST devrait être lui aussi impacté par ces tendances lourdes et ce « glissement » vers les pays émergents que ce soit en termes de demande, de marchés ou encore de recherche et d'innovation.

Le facteur applicatif

Prenons comme exemple le Japon qui affiche une politique volontariste dans le domaine des NST. Le NEDO (*New energy and industrial technology development organization*) a réalisé une projection sur les différents marchés liés aux NST à l'horizon 2030. Le marché le plus porteur, ou plutôt celui qui développerait le plus de chiffres d'affaires, serait la microélectronique (**Figure 24**). En revanche, selon d'autres sources, les NST sont dites poursuivre des progrès rapides, notamment dans le domaine de la biologie, de la nano médecine.

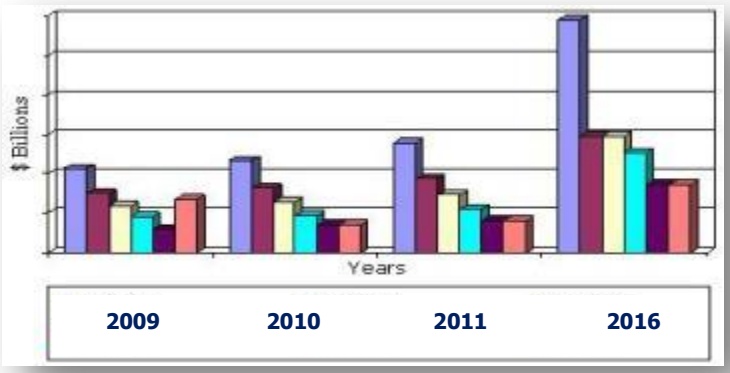
Selon *BCC Research*, le marché global de la nanomédecine était proche de 50 Md$ en 2011 et pourrait atteindre 100 Md$ en 2016 avec un fort développement dans les domaines des médicaments soignant le système nerveux central, des anti-infectieux et des anti-cancéreux (**figure 25**).

[51] *Economie mondiale à 2050*, CEPII

Technology Field	Market Potential		Typical Products
	JPY Billion	US$ Billion	
Electronics	18,013.5	180.125	FED/SED, Organic/Inorganic Electroluminescence (EL), Data Projector, Inkjet Printer
Fuel Cell/Energy	4,430.0	4.430	Fuel Cell Automobile, Home Use Fuel Cell, Cogeneration System
Biomaterials/Medical/ Cosmetics	1,140.0	11.400	Drug Delivery System (DDS), Diagnostic Testing System, Artificial Biomaterials
Catalysts/Paints/Materials	1,526.2	15.262	CNT, Fullerene, Nanofiber, Nanocomposite
Ultra-precise Manufacturing and Processing	679.2	6.792	Chemical Vapor Deposition (CVD)/Physical Vapor Deposition (PVD) for Nanofilm Fabrication
Environment	80.0	0.800	Nanofilter, Membrane reactor
Air/Ocean/Land Transportation	150.0	1.500	Aircraft Materials, Fuel Cell
Evaluation/Estimation	245.6	2.456	Scanning Probe Microscope (SPM), Focused Ion Beam (FIB), Scanning Electron Microscope (SEM), Transmission Electron Microscope (TEM), Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS), Particle Size Analyzer, Time-of-Flight SIMS (ToF-SIMS)

Figure 24 : Estimation du NEDO du marché potentiel des Nanotechnologies en 2030 pour différents secteurs technologiques

Il est important de bien noter ce qu'incluent réellement les chiffres d'affaires (CA) reportés dans les études : CA du système complet, CA du matériau dans lequel des nano particules ont été incorporées ou CA des nanoparticules



CNS Anti-infectieux Anti-inflammatoire
Anti-cancéreux Cardiovasculaire Autres

Figure 25 : Vente globale de nanomédecine par champ thérapeutique entre 2009 et 2016 (Md US $)

Prospective

Tendances lourdes

Le marché des NST est en croissance : depuis 2005, la croissance augmente de 10% à 15% par an. Au niveau macroéconomique, une tendance globale se dégage même si les différents segments de marchés sont amenés à connaitre des courbes de croissance différentes sur la prochaine quinzaine d'années. Cependant, la tendance suggère que les secteurs de l'énergie, l'électronique l'environnement et de la santé connaitront un taux de croissance plus élevé que les autres segments. La demande marché adossée à des demandes et besoins sociétaux est en lien avec ces domaines industriels clefs avec l'émergence de nouveaux produits-systèmes-solutions

La raréfaction des ressources naturelles est une tendance lourde qui aura un impact important dans la capacité à répondre à cette forte demande marché et sociétale.
En parallèle, des interrogations vis-à-vis des risques potentiels liés aux NST sont grandissantes au sein du grand public et de la communauté scientifique.
Enfin, les pays émergents (BRICS) et de la Corée du Sud montent en puissance en termes de production et de consommation de « nano ».

Incertitudes majeures

Les incertitudes concernent le positionnement et la capacité des pays émergents à développer les NST et à en assurer la production. La politique volontariste des pays développés n'est pas certaine dans le futur, ce qui peut remettre en question leur capacité à garder la maîtrise des NST.

La question du niveau de différenciation apporté par l'échelle nanométrique est cruciale notamment pour combler le surcoût engendré par la ou les réponse(s) à apporter aux contraintes réglementaires et normatives (< 100 nm) grandissantes, et pour le surcoût de production. La défiance du grand public est aussi un facteur limitant plausible du développement des NST.

Les incertitudes concernent également de façon plus générale les aléas économiques (crises monétaire, crise bancaire) et les fléaux majeurs (épidémie, guerre, etc.).

Hypothèses prospectives

Cette étude porte sur le marché des NST au niveau mondial (échelle macroéconomique). L'analyse a été réalisée de façon globale afin de ne pas multiplier les hypothèses, les critères géographiques et taux de croissance ne pouvant être éliminés pour bâtir des scénarii. Une étude spécifique sur chaque secteur peut être menée dans le cadre d'une autre étude. L'adéquation de la demande et du développement en termes de timing et de performance des NST a été prise en compte dans l'élaboration des différentes hypothèses.

Hypothèse 1 : Marché en forte croissance de l'ordre du 10 à 15% par an et demande très soutenue

Cette hypothèse suppose une forte demande marché et une forte adéquation entre cette demande et le développement des NST que ce soit en termes de « timing » ou de performances. Il y a alors une forte émergence de nouvelles applications/nouveaux modèles économiques et le développement simultané de marchés de masse et de marchés de spécialités.

Hypothèse 2 : Marché en croissance de l'ordre de 5 à 10% par an, demande soutenue et une Europe marginalisée

Cette hypothèse suppose un fort développement technologique des NST mais une adéquation partielle de ces développements avec les attentes du marché que ce soit en termes de performances, de temps (transfert technologique), etc.

Les économies dites émergentes comme la Chine, la Corée du Sud, ou encore l'Inde auront une place majeure dans le développement des NST et profiteront de croissance. Ils seront non seulement portés par la demande de leur marché intérieur mais également par le développement scientifique et technologique de leur pays soutenu par des fonds étatiques et une politique volontariste. Les économies émergentes profiteraient majoritairement de cette croissance.

Hypothèse 3 : Marché en croissance de l'ordre de 5 à 10% par an, une demande soutenue et une prospérité partagée

Cette hypothèse suppose, comme l'hypothèse 2, un fort développement technologique des NST mais une adéquation partielle de ces développements avec les attentes du marché. Malgré un contexte mondial complexe et une compétition féroce (y compris dans le domaine de l'innovation), la croissance serait partagée de façon équitable entre les différentes zones du globe.

Hypothèse 4 : Marché en faible croissance de 5% par an du fait d'une demande atone en partie liée à un encadrement normatif contraignant ou une défiance du grand public

Cette hypothèse suppose que la croissance du marché est limitée par une demande atone, du moins en Europe. Celle-ci peut être due à un système de financement européen favorisant des TRL élevés et donc non propice à l'innovation de rupture et donc la compétitivité européenne, au développement de systèmes normatifs et réglementaires grippant les mécanismes de croissance de ces nouvelles technologie ou encore à un comportement de défiance de la part du grand public à l'égard de ces nouvelles technologies, ou encore

VARIABLE V3 « PILOTAGE DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION »

Rédacteurs : Michel DE LABACHELERIE (CNRS), Vincent BOLY (Université de Lorraine), Philippe LAMBERT (IJL- C'Nano), Julie CARIMALO (CNRS- C'Nano), Ariel LEVENSON (CNRS- C'Nano)

Définition de la variable et indicateurs

Cette fiche s'intéresse aux politiques publiques mises en place pour l'innovation en NST sur le territoire français et à leurs conséquences. Elle décrit les caractéristiques du management de l'innovation ainsi que ses effets sur le développement des NST. Dans cette étude, le terme « innovation » recouvre la production de connaissances nouvelles, le développement de nouvelles applications et la valeur ajoutée produite par les entreprises faisant appel à ces technologies. Il inclut différentes dimensions : un produit, un procédé, la mise en œuvre d'une nouvelle ressource, une dimension commerciale (ex. investissement dans un nouveau marché), organisationnelle (ex. nouveau mode de pilotage), financière (nouvelles dispositions dans la gestion des capitaux pour accroître l'attrait des actions), ou d'usage (développement d'une nouvelle pratique).

Les indicateurs permettant d'évaluer les modèles d'innovation français mis en place concernent les dispositifs et outils spécifiques pour la R&D en NST, l'efficacité de leur coordination et de leur exploitation. D'autres indicateurs pertinents, tels que les performances scientifiques (nombre de publication et facteur d'impact), le nombre de brevets et de création d'entreprises, la quantité de produits « nano » mis sur le marché, le nombre d'emplois liés et enfin les profits générés par les acteurs de la chaine de valeurs « nano », sont traités dans d'autres fiches variables dans cette étude (voir fiches V1 « *Pôles de R&D et de production mondiaux* », V2 « *Demande et marchés des Nanosciences et Nanotechnologies à l'international* », V7 « *Perspectives d'emplois liés aux NST* »).

Rétrospective

Une analyse de la politique publique française en NST ne saurait se concevoir sans une mise en perspective internationale par comparaison avec les caractéristiques des politiques publiques étrangères. Le lecteur trouvera dans la fiche variable V1 « *Pôles de R&D et de production mondiaux* » un état de lieu des politiques étrangères et des indicateurs qui incluent la France. La présente fiche se concentre sur les spécificités françaises.

Positionnement international des NST françaises : quelques chiffres clefs

D'après un recensement réalisé par le réseau C'Nano, le secteur des NST représente en France environ 7500 chercheurs et enseignants chercheurs permanents et non permanents et plus de 300 laboratoires académiques**.** Les investissements publics sont estimés à 450 M€ (6ème position mondiale derrière les Etats-Unis, le Japon, la Chine, l'Allemagne et le Royaume-Uni). La France tiendrait le même rang au niveau des investissements privés, passant de la 5ème place en 2001 à la 6ème en 2013. Ces données peuvent être mises en regard du 5ème rang français en termes de nombre et de facteur d'impact des publications. A noter qu'en termes de brevets, la position de la France s'écroule entre 1996 et 2005 : les Etats-Unis et le Japon ont déposé respectivement 38,4 et 33,5% des brevets mondiaux en NST alors que la France n'en déposait que 1,9%, largement dépassée par la Corée avec 8%. Pendant la période 2005-2009, la Chine a occupé la première place en termes de nombre de brevets déposés devant les Etats-Unis. Ces derniers restent

toutefois leaders pour les brevets prioritaires, suivis du Japon et de la Chine, la France, elle, se situant en 10ème position en 2012[52].

Divers documents permettent d'identifier qualitativement les produits issus des NST. Leur impact en termes de marché ou de valeur ajoutée est pour le moment difficile à évaluer du fait de leur relative dispersion sur de nombreux secteurs applicatifs. En octobre 2013, ce sont cependant 1628 produits qui ont pu être recensés par le projet PEN (*Project on Emerging Nanotechnologies*) sur le marché mondial dont 440 au niveau européen. Selon le rapport interministériel français[35], la production mondiale de nanomatériaux a été en outre multipliée par 10 entre 2002 et 2011. Une étude réalisée en 2009 positionne alors la France en tant que « *challenger* » en termes de compétitivité au niveau mondialau même titre que les Etats-Unis[53] (voir variable 2 « *Demande et marchés des Nanosciences et Nanotechnologies à l'international* »). Une évaluation plus précise de la place française reste néanmoins à réaliser.

Caractéristiques du modèle d'innovation français

D'un point de vue général, les traits marquants du Système Français de la Recherche et de l'Innovation (SFRI) sont :

1) le **rôle essentiel joué par l'État** : la part de l'État dans le financement des dépenses de R&D était de 37 % en 2010 (en fait, près de 50 % si l'on prend en compte le crédit d'impôt recherche), comparée à 30% dans les pays de taille et de richesse comparables (Allemagne, Royaume-Uni).
2) le **faible poids des Universités** au sein de la recherche publique, laquelle est exécutée essentiellement dans des organismes publics de recherche (OPR) tels le CNRS ou le CEA.
3) La **proximité de l'État et des grandes entreprises**, que ce soit d'un point de vue stratégique (association des entreprises aux projets publics) ou financier (achats publics et aides de l'État).

Différentes étapes caractérisent l'évolution du SFRI et du Modèle d'Innovation (MI) (**Figure 26**) :

- **MI de première génération** (1950–1960) **« *Research push* »** : processus issu d'une découverte scientifique, passant à travers les étapes d'invention, étude et réalisation pour terminer sur une phase de *marketing*. Le défi était la gestion efficace des investissements de R&D.
- **MI de 2ème génération** (1960) **« *Market pull* » :** innovations découlant d'une demande perçue par le marketing et l'identification des besoins du client
- **MI de 3ème génération** (1970) est une combinaison des deux premiers modèles : le principal défi est la communication inter-organisationnelle entre marketing et recherche.
- **MI de 4ème génération « *Innovation collaborative* »** : prise en compte de communications entre les acteurs internes (R&D, *marketing*, distribution...) et les acteurs externes.
- **MI de 5ème génération** (2010 -) **« *Open Innovation* »** : les acteurs des entreprises et les acteurs externes collaborent en continu, *via* notamment les nouvelles technologies digitales. Des plateformes d'innovation ouverte se développent de plus en plus pour jouer le rôle de systèmes d'intermédiation entre des entreprises innovantes et des contributeurs externes (petites entreprises, centres de recherche, inventeurs ou experts retraités). Ces systèmes se concrétisent par des plateformes internet qui permettent le regroupement des experts et des industriels autour d'une problématique industrielle, la mise en relation d'un offreur et d'un demandeur de technologies, la gestion de bases de données permettant à un utilisateur de trouver un partenaire

[52] www.statnano.com
[53] *Position of the countries in nanotechnology and global competitiveness*, Journal of the theory and practice management, 2013

Malgré l'effort déployé pour favoriser l'innovation et la valorisation des résultats issus de la R&D, on peut encore constater une faiblesse du lien explicite entre recherche amont et industrie et le manque de positionnement vis-à-vis du *nanomanufacturing* une tendance en développement dans d'autres pays tels que l'Allemagne (factory 4.0), les Etats-Unis ou le Japon.

Panorama des outils spécifiques pour la R&D en NST

Contrairement aux Etats-Unis où le programme NNI permet de gérer efficacement un sujet transverse tel que les NST, il y a en France peu de coordination entre les activités « nano » de chaque ministère concerné. Dans le cas de la défense, il faut cependant citer un appel à projets conjoint entre l'ANR et la DGA (ASTRID) qui finance des projets amont duaux (jusqu'au niveau de maturité technologique correspondant au TRL3). Toutefois, la France bénéficie d'un certain nombre d'outils de soutien en NST et en 2009, une stratégie nationale de recherche et d'innovation » (SNRI) a été élaborée par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, dans laquelle les NST sont identifiées comme une de ses priorités.

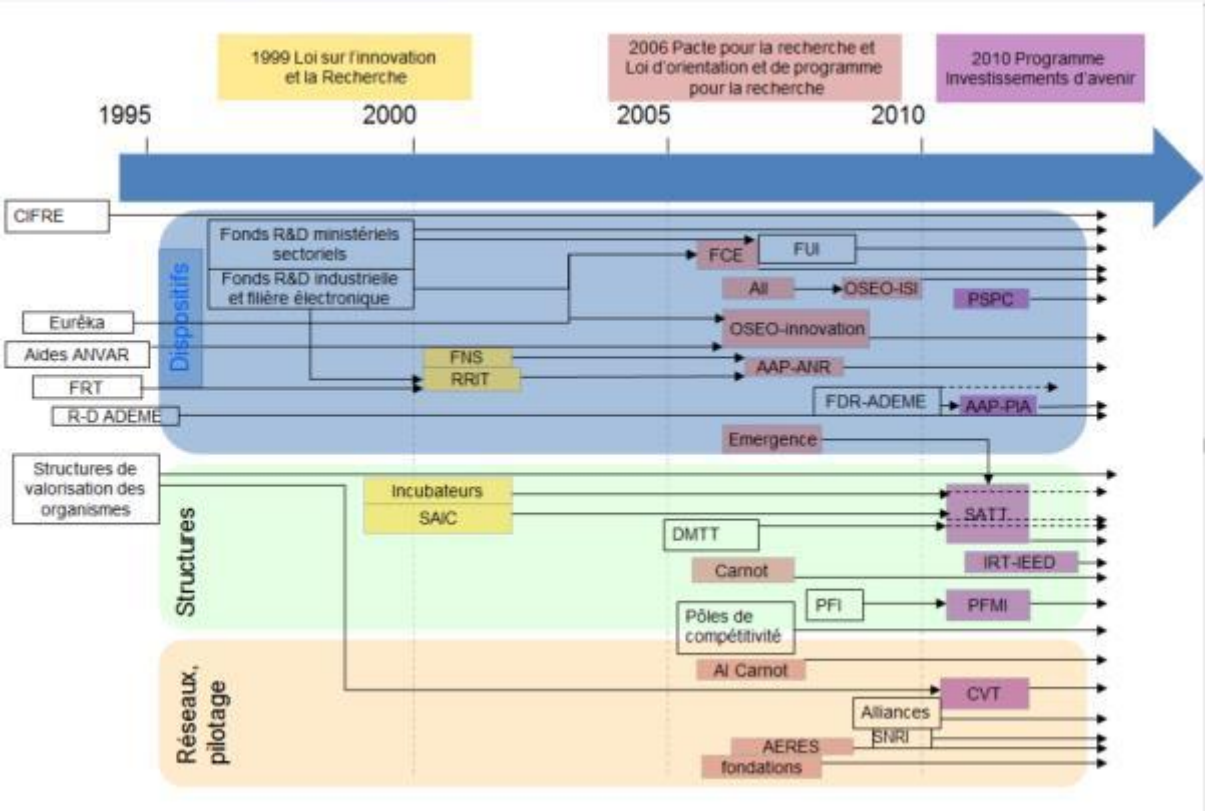


Figure 26 : Evolution des outils nationaux de l'innovation depuis 1995

En 2009, Le Ministère de la Recherche met en place une politique de recherche et d'innovation appelée « Stratégie nationale pour la recherche et l'innovation » (SNRI). La mise en œuvre de la SNRI s'est traduite en particulier par le lancement d'un Programme d'investissement d'avenir (PIA). L'ensemble des opérations a mobilisé 47 Md€ : 35Md€ en 2010 et 12Md€ en 2014. Ces fonds ont notamment permis un soutien à la recherche et aux projets innovants (AAP-PIA géré par l'ANR), la création des instituts de recherche technologique (IRT), des Institut hospitalo-universitaire (IHU), des sociétés d'accélération du transfert de technologies (SATT) et un soutien au projet de *cluster* technologique Paris-Saclay.

Les outils de financements en NST

Le premier programme français spécifique des NST a été le Programme National français en Nanosciences (2002 – 2004). En 2006, programme national PNANO (devenu ensuite P3N puis P2N) a été lancé par l'ANR avec un budget de 35 M€. Un effort a également été fait pour stimuler la R&D privée (plans de relance, crédit d'impôt, pôles de compétitivité) et resserrer les liens entre les entreprises, les centres de recherche publics / universités et les infrastructures. Un exemple est le lourd investissement dans le développement de grappes d'innovation telles que MINATEC à Grenoble regroupant des universités, l'industrie et le transfert de technologie.

Jusqu'en 2013, l'Agence Nationale pour la Recherche a piloté plusieurs appels à projets pour un total d'environ 30 M€ dans tous les domaines concernant les NST. Le Programme « blanc » a consacré environ 12 M€ aux NST, le Programme de National de Nanosciences et de NST (P3N) dédié aux applications des NST était doté de 22 M€. En 2012, une part de recherche « intégrative » a été programmée. Par ailleurs, l'ANR a noué des accords de collaboration internationaux sur les NST avec : Taiwan (2011, 2012), le Mexique (2011, 2012), la Chine (2011), la Corée (2011), les USA (2011, 2012), la Norvège (2012), l'Autriche (2011, 2012).

Le support au déploiement industriel en matière de NST a été soutenu également par le plan NanoInnov 2012 qui visait à déployer des infrastructures de recherche pour atteindre une masse critique dans trois villes avec une certaine spécialisation sectorielle, à Toulouse, à Grenoble et à Saclay.

Lors de la première phase du programme d'investissement d'avenir (PIA) en 2011, ce plan a labellisé 2 Instituts de recherche technologique (IRT) : l'IRT Nanoélectronique à Grenoble et l'IRT Jules Verne sur les matériaux composites à Nantes. Divers laboratoires d'excellences ont été reconnus dont le LabEx NanoSaclay, à Toulouse le LabEx « *Nano mesures EXtrêmes et Théorie* » (NEXT), le LabEx Serenade du CEREGE à Aix-en-Provence dont la recherche est focalisée sur l'éco-conception et la nanosécurité tout au long du cycle de vie des nanoproduits, Nanosciences énergies du futur (LanEx) à Grenoble. La seconde phase du PIA annoncée fin juin 2013 pour un montant de l'ordre de 12 Md€, a concerné la recherche universitaire et les technologies clefs, les énergies du futur, les piles à combustible et la biomasse, et enfin l'industrie, pour 1,7 Md€. Les domaines plus particulièrement concernés par les NST sont : la robotique, les technologies de communication et de paiement sans contact, les nouvelles générations de carburants, l'industrie des dispositifs médicaux et les nouvelles techniques de santé, les réseaux intelligents et les technologies d'excellence pour les domaines aéronautique, spatial et de défense. Au moins neuf LabEX sont concernés par les NST[54].

Les Infrastructures de micro- et nano-fabrication

Les centrales à vocation nationale du réseau RTB

Le programme national de Recherche Technologique de Base (RTB) lancé en 2003 par l'Etat a créé un réseau de grandes centrales de NST. Un investissement de 130 M€ sur 8 ans a ainsi été réalisé sur 7 grandes plateformes technologiques du CNRS et du CEA, afin qu'elles rattrapent en partie leur retard par rapport au réseau américain de plateformes de NST supervisé par la NNI[55]. Une grande centrale technologique se définit comme un ensemble cohérent d'équipements permettant de réaliser un démonstrateur de faisabilité complet incluant son encapsulation finale (centrales d'intégration). Elles sont positionnées entre les équipements dédiés des laboratoires et les lignes pilotes industrielles, et permettent de diffuser les savoir-faire en accueillant et en formant des utilisateurs académiques ou industriels.

[54] http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid55551/investissements-avenir-projets-labex-par-region-domaine.html#labex-domaine
[55] http://www.nnin.org

Ces grandes centrales, réparties sur le territoire, sont de deux types complémentaires :

- **les 6 grandes centrales de micro- et nanotechnologie CNRS-universités** (7000 m^2 au total localisés à Lille, Besançon, Ile-de-France sud, Grenoble et Toulouse), regroupées au sein du réseau RENATECH et dont les travaux sont plus orientés vers les ruptures technologiques et les sujets de recherche plus fondamentaux. Le réseau RENATECH est ouvert à tout utilisateur (académique ou industriel) qui a besoin de réaliser un micro- ou nano-objet. Il comporte un point d'accès national unique, un mode de tarification simple, une évaluation annuelle par un comité international etc.). La part d'utilisateurs externes a augmenté d'un facteur 3,5 depuis 2004 13% du nombre total d'heures de travail de ces centrales est dédiée à des utilisateurs industriels, en particulier des PME de proximité.
- **le CEA-LETI** (8000 m^2 de salle blanche à Grenoble), développe des recherches en micro- et nano-technologies depuis la preuve de concept jusqu'au au prototype en se positionnant entre la recherche académique et le développement industriel. La centrale technologique du CEA-LETI a fléché les investissements du programme RTB sur la constitution d'un centre de nano-caractérisation de niveau mondial dans lequel le CEA-LETI a investi 18M€ depuis 2006.

En 2006, quatre de ces centrales sont labellisées Instituts Carnot : CEA/LETI, FEMTO- Innovation, l'IEMN et le LAAS.

Les Centrales de proximité

Neuf centrales technologiques dites de proximité (Paris Centre, Saclay, Villetaneuse, Marseille-Sofia Antipolis, Montpellier, Grenoble, Lyon, Rennes, Nancy-Strasbourg) ont été labélisées par le MESR, le CNRS et le CEA. De taille plus restreinte que les précédentes (de l'ordre de quelques centaines de mètres carrées de salle blanche), elles ont un rôle plus local. Elles sont spécialisées dans un sous-ensemble de procédés et visent à mutualiser les outils pour permettre une réponse réactive aux besoins d'un campus ou d'une région. Après une période d'investissements récurrents co-encadrés par le MESR et le CNRS, la visibilité sur le soutien financier à ces centrales a diminué.

Les pôles de compétitivité

Depuis 2005, plusieurs pôles de compétitivité impliqués dans les NST ont été mis en place dans le but de rassembler sur un territoire et une thématique donnés des entreprises de toute taille, des laboratoires de recherche et des établissements de formation, afin de favoriser l'innovation et le développement et la croissance des entreprises qui en font partie. On peut citer Materialia, Minalogic, Solutions Communicantes Sécurisées, Photonique, Microtechniques, Sciences et Systèmes de l'Energie Electrique.

Les outils d'animation en NST

Le réseau national de coordination et d'animation scientifique dans les NST : C'Nano

Depuis 2006, un réseau national fédérant les six centres de compétences régionaux ou inter-régionaux C'Nano apporte une coordination nationale des NST[56], soutenue par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR), le CNRS et le CEA. Au sein du réseau sont représentés tous les organismes de recherche français dont l'INSERM, l'INRA, l'ONERA, le LNE et les grands instruments tels que le Synchrotron Soleil ainsi que 48 Universités et 44 écoles d'ingénieurs et professionnelles françaises. Aujourd'hui, il regroupe plus de 7000 scientifiques provenant d'environ 300 laboratoires de recherche de toute discipline (physique, chimie, biologie, ingénierie, médecine, pharmacologie toxicologie, droit,

[56] www.cnano.fr

sociologie, économie, philosophie, etc.) reflétant ainsi le caractère interdisciplinaire des nanosciences et NST.

L'ensemble des actions menées par le réseau C'Nano se décline en trois axes majeurs : 1/Soutien à la recherche de rupture/interdisciplinaire et animation scientifique ; 2/Echanges avec la société et diffusion du savoir ; 3/Promotion de l'interface entre académie et industrie (programme de création de start-up, interactions avec les pôles de compétitivité et Chambres de commerce). De plus, en fort lien avec les centrales de proximité, C'Nano facilite l'accès aux plateformes technologiques de proximité et nationales (réseau RENATECH et CEA-LETI).

Enfin, selon un rapport paru en décembre 2013 suite à une étude menée par une mission interministérielle, le réseau C'Nano présente « *…un potentiel certain, en matière d'aide à la décision publique et d'accès des industriels aux connaissances transférables* »[3535.]

Le Club nanoMétrologie

Créé en partenariat entre C'Nano et le Laboratoire national de Métrologie et d'Essais (LNE) dans le but de fédérer une communauté, académique et industrielle, élargie sur la métrologie à l'échelle nanométrique, le Club nanoMétrologie (CnM)[57] organise des journées thématiques, des rencontres annuelles, assure de la veille et de la diffusion des connaissances métrologiques et a récemment lancé deux inter-comparaisons de mesure à l'échelle nationale. Depuis juillet 2014, le CnM fait l'objet d'un accord de partenariat entre le CNRS et LNE[58]. Le Club compte aujourd'hui plus de 340 adhérents dont 30% d'industriels.

L'outil de veille scientifique et technologique en micro- et nano-technologies : l'OMNT

L'Observatoire des Micro- et nanotechnologies (OMNT)[59] est une structure cofinancée par le CEA et le CNRS qui réalise une veille scientifique continue dans le domaine des NST : procédés et dispositifs amont, NTIC, Sciences du vivant et Energie. Plus de 300 experts réunis en 10 groupes thématiques analysent les publications sur les NST et sélectionnent les meilleurs d'entre elles pour en faire un résumé accessible, largement diffusé.

Prospective

Déterminants de l'évolution future de la variable

Les contraintes budgétaires ou le rejet sociétal pourraient conduire à une diminution ou à une répartition différente du financement public des NST. Les atouts compétitifs des pays étrangers concernant la mise sur le marché des produits intégrant la technologie des NST, pourraient déclencher une modification de l'organisation du système d'innovation français afin d'optimiser le processus de mise sur le marché. La nécessité de prouver la non-toxicité des produits intégrant les NST et ainsi le développement d'outils de caractérisation, d'analyse du cycle de vie ou de prédiction (voir fiche V10 « *Risques et gestion des risques* ») sont devenus incontournables.

[57] www.club-nanometrologie.fr
[58] http://www.cnrs.fr/lettre-innovation/actus.php?numero=192
[59] www.omnt.fr

Tendances lourdes

Démultiplication des dispositifs d'accompagnement de la R&D en France

On constate une stratification, conséquence de l'empilement de couches successives des dispositifs d'accompagnement de la R&D rendant difficile l'identification par les acteurs des interlocuteurs idoines. C'est le cas notamment pour ce qui concerne la valorisation et la création d'entreprises.

Manque de coordination nationale des NST

Contrairement à ce qui est observé dans certains pôles mondiaux, la France n'a pas mis en place de coordination interministérielle sur les NST qui permettrait d'implémenter une stratégie cohérente pour le développement de ces nouvelles technologies. Ce manque nuit à la continuité du processus Recherche-développement-innovation (R&D&I), à l'attractivité et à la compétitivité françaises au niveau international.

Forte mobilisation des acteurs en NST

Conscients de l'intérêt stratégique des NST et de leur caractère interdisciplinaire, les acteurs académiques se mobilisent fortement en France depuis une dizaine d'années autour d'un réseau d'animation interdisciplinaire, de centrales de technologies mutualisantes et d'une structure de veille scientifique et technologique. En outre, divers modèles d'interactions entre laboratoires académiques et industriels sont mis en place, allant du club de partenaires aux laboratoires communs. Ces outils constituent un socle solide mais faiblement exploité pour la mise en place d'un nouveau modèle d'innovation qui serait basé sur le réseautage, le *clustering* par filière et l'innovation ouverte.

Manque de visibilité des apports des NST

L'organisation des appels à projets de l'ANR en défis sociétaux, en l'absence d'identification du caractère générique clef des NST, nuit à la constitution de filières « nano » spécifiques, cloisonne les apports des NST et contraint les potentiels d'innovation au sein d'un défi ou d'une filière industrielle stratégique donnée. Cette démarche, à travers laquelle les NST apparaissent de façon implicite, contraste avec les efforts de structuration de la communauté scientifique concernée en réseaux pluridisciplinaires et nuit à la continuité de la chaîne d'innovation amont-aval. Au-delà de l'ampleur du financement, le « *nano sans le savoir* » constitue un frein à la diffusion des solutions NST et à la structuration de filières NST.

Manque de continuité du processus d'innovation

Au niveau international, des puissances scientifiques émergentes déploient des efforts importants pour réduire le temps de mise sur le marché (*time-to-market*) de produits « nano » : rapprochement des laboratoires académiques et des industriels, développement d'outils de *nanomanofacturing* intégrant les aspects simulation, conditions avantageuses et attractives pour les équipes d'excellence, etc. De telles démarches impliquant des coûts élevés, elles ne sont pas entreprises dans la continuité en France. Le manque de partenariats entre start-up et grands groupes est toujours persistant et la lacune française en entreprises de taille intermédiaire (ETI) constitue un frein supplémentaire.

Au niveau européen, la stratégie H2020 soutient en priorité les projets à TRL élevés, ne favorisant pas les innovations de rupture qui nécessitent des programmes de R&D amont (voir fiche V5 « *Relations entre acteurs industriels* »). Il s'agit d'une tendance qui devrait également impacter la compétitivité française.

Du côté des industriels, la recherche incrémentale est favorisée et impulsée par les activités *marketing*. L'objectif d'efficacité des investissements industriels en R&D est une tendance lourde pour la plupart des grands groupes amont (voir fiche V5 « *Relations entre acteurs industriels* »).

Incertitudes majeures

Plusieurs incertitudes majeures peuvent être dégagées :

- La stabilité des politiques publiques et la pérennité des financements pour les NST
- La mise en place d'un programme national interministériel sur les NST par une politique volontariste
- L'évolution du système d'innovation en NST vers un système d'innovation ouverte
- La capacité à exploiter la dynamique interdisciplinaire des acteurs français en NST
- La capacité à raccourcir le temps de mise sur le marché des produits « nano »

Hypothèses prospectives

Hypothèse 1 : Système de coordination général et actif pour les NST en France avec une amélioration du lien entre la recherche amont et l'industrie, une meilleure prise en compte du *nanomanufacturing*, de la prise de risque et de la valeur potentielle créée à terme

L'évolution vers des systèmes d'innovation associant les acteurs de la recherche publique et les entreprises dès le début du processus permet d'envisager une accélération de la mise sur le marché des produits, y compris les produits issus des NST. La coordination mis en place permet d'utiliser efficacement l'ensemble des outils interdisciplinaires investis par la communauté des NST et de les interfacer avec les structures dédiées à la valorisation.

Ainsi sont déployés des systèmes d'innovation qui incluent les concepts d'innovation ouverte et supposent une collaboration étroite entre la recherche publique et l'industrie dès les premières étapes du processus et les concepts de clusters d'innovation qui permettent également de diminuer les temps de développement par une proximité géographique favorisant les échanges entre les acteurs. Evidemment, un mode de pilotage commun entre la recherche publique et l'industrie devient alors l'élément clés de coordination des efforts tout au long de la chaine de l'innovation. Un effort global sur le *nanomanufacturing* est entrepris pour améliorer le temps de mise sur le marché.

Hypothèse 2 : Priorités mises sur les fonctions et les impacts sociétaux en continuité avec H2020

Sous la pression de contraintes budgétaires, un fléchage sur des thématiques prioritaires à fort impact sociétal est réalisé aux dépends de certaines technologies génériques. Les NST sont dès lors une solution en compétition avec d'autres domaines de recherche et technologies et on assiste à une absence de pilotage stratégique des NST. La raréfaction des financements dédiés aux TRL faibles (déjà effective dans le programme Horizon 2020) entraîne un certain nombre de problèmes au niveau de la dynamique d'interaction entre acteurs académiques et industriels et entre industriels et *in fine* pour le ressourcement des innovations de rupture.

Hypothèse 3 : Stratégie de contournement des solutions technologiques impliquant les NST

Les craintes de pressions sociétales amènent les décideurs politiques à privilégier d'autres approches scientifiques et solutions technologiques que les NST.

VARIABLE V4 « RELATIONS ACADEMIE – INDUSTRIE »

Rédacteur : Thierry BILLON (CEA), Ariel LEVENSON (CNRS- C'Nano), Olivier PEYRET (CEA), Elodie THACHIL (CNRS- C'Nano), Julie CARIMALO (CNRS- C'Nano)

Définition de la variable et indicateurs

Les relations entre le monde académique et l'industrie peuvent revêtir des formes très diverses qui dépendent du contexte historique, politique, culturel et des forces et faiblesses des tissus académique et industriel. Or, le couplage amont-aval entre les acteurs académiques et industriels est un élément clef à la fois pour maintenir une recherche amont au meilleur niveau international et couvrant le continuum amont-aval, pour préparer les ruptures technologiques et pour soutenir le renouveau de l'industrie française.

Un des indicateurs pertinents de ces relations concerne le nombre exact d'entreprises faisant appel à la recherche publique dans le cadre d'appel à projets, de laboratoires communs ou encore de contrats directs bilatéraux. De telles données ne sont toutefois pas facilement accessibles et sont très souvent incomplètes. La place de l'interface ou l'interaction académie/industrie dans une filière donnée constitue également un élément important. En effet, dans le domaine des NST, les ruptures technologiques peuvent nécessiter de forts investissements. L'efficacité voire l'existence d'un transfert peut dépendre du niveau auquel se produit l'interaction au sein de la chaîne développant la filière : laboratoire/fournisseur « 1 », laboratoire/fournisseur « n », ou laboratoire/utilisateur final. Or il n'existe pas encore véritablement de filière « nano » (voir variable 5 « *Relations entre acteurs industriels* »), une autre caractéristique de ces technologies résidant dans leur généricité.
D'autres indicateurs indirects existent et sont souvent fournis par les laboratoires, essentiellement lors d'audits. A titre d'exemples, on peut mentionner le nombre de brevets déposés par les laboratoires et instituts de recherche, de publications et brevets communs entre laboratoires académiques et industriels, de laboratoires communs et de projets déposés intégrant un couplage « académie - industrie ».

Rétrospective

Il existe différentes formes de couplage académie-industrie selon des niveaux de relation pouvant aller de très partiel et informel (réunions ou *brainstorming* communs) à un niveau très imbriqué et formalisé (équipe mixte commune sous contrat bilatéral) en passant par des collaborations ponctuelles formalisées par des projets financés par des agences ou par l'industriel lui-même.
L'évolution des politiques de la recherche en France et les programmes de financement sur projets ont joué un rôle important dans la structuration des relations académie-industrie. Ces politiques sont passées, entre le début des années 80' et la fin des années 90', d'une logique de soutien à la production de stocks de connaissances académiques (potentiellement mobilisables par l'industrie) à une logique d'organisation des flux de connaissances entre laboratoires publics et entreprises, dans le secteur de l'électronique et des micro- et nanotechnologies[60]. Cette même étude met en évidence la combinaison de mécanismes de contrôle externe, « d'autocontrôle et d'interdépendances croisées : ces évolutions inscrivent beaucoup plus étroitement le travail des chercheurs dans des problématiques industrielles, redéfinissant ainsi les contours de leur autonomie professionnelle ».

Les processus d'innovation étant aujourd'hui en pleine mutation, les entreprises ne peuvent de leur côté, plus se fonder uniquement sur leur propre recherche pour innover. Les moyennes et grosses industries se

[60] *Gouverner (par) les finances publiques*, Bezes, P. et A. Siné, Les Presses de Sciences Po, 2011

tournent vers le secteur académique. Il en est de même de la petite industrie qui y trouve un moyen de détecter de nouvelles connaissances et technologies et d'établir les preuves de concept nécessaires à toute décision d'investissement.

Les structures et dispositifs français d'incitation à la recherche partenariale

Un rapport interministériel publié en 2013 décrit cinq familles de dispositifs d'incitation à la recherche partenariale en France mises en place depuis les années 90' et reportées ci-dessous[61] :

- **Les programmes collaboratifs public-privé** à travers des appels à projets partenariaux lancés par des administrations centrales, comme la DGCIS pour le Fonds Unique Interministériel (FUI) ou la DGA, ou par des opérateurs de l'état telles que l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) ou OSEO.
- **Les incitations fiscales** à travers le Crédit Impôt Recherche pour les entreprises innovantes mettant en place des partenariats avec des laboratoires publics.
- **Les réseaux ou *clusters* rapprochant acteurs académiques et industriels**, comme les pôles de compétitivité et leurs projets structurants (PSPC). Ces *clusters* sont soit imbriqués, avec parfois le risque de s'appuyer sur des acteurs industriels dont l'implantation est fragile, soit duaux et ils s'appuient alors sur des multinationales étrangères. Une étude souligne la diversité de ces *clusters* en France aussi bien en micro-nanoélectronique qu'en nanomatériaux, instrumentation et nanobiotech[62]. Ce même rapport décrit que de fortes capacités existent et sont à exploiter dans le domaine des nanomatériaux et des nano-instruments, ainsi que dans celui des nanobiotech, pour lequel les compétences technologiques françaises se retrouveraient dans des *clusters* autocentrés, nationaux ou internationalisés.
- **Les structures de recherche favorisant ou hébergeant la recherche partenariale,** telles que les structures labélisées « *Institut Carnot* » ou les instituts de recherche technologique (IRT), des instituts thématiques interdisciplinaires, rassemblant les compétences de l'industrie et de la recherche publique.
- **L'aide aux doctorants en entreprise** à travers les conventions industrielles de formation par la recherche (bourses CIFRE).

Ces dispositifs ne permettent toutefois pas le développement de partenariats entre acteurs publics et privés sur le moyen ou long terme pour mener des recherches sur des thématiques pérennes. Pour pallier ce manque, des structures communes de recherche publics/privés (SCR) ont été mises en place permettant une recherche partenariale plus intégrée et un engagement des ressources humaines et matérielles sur une durée supérieure que dans le cadre de contrats ou projets, allant de 4 à 5 ans. Ce mode de partenariat serait propre au modèle d'innovation français.

Trois types de SCR ont été développés :

- Les SCR correspondant à des **équipes mixtes de recherche** (UMR) entre opérateurs de la recherche académique et entreprises sont les plus répandues et sont propices au regroupement de compétences et expertises complémentaires, ce qui permet de focaliser les travaux de recherche sur des thématiques positionnées à l'interface de plusieurs disciplines scientifiques. On peut citer par exemple l'Unité mixe de Recherche CNRS/Thalès (UMR137).
- Les **chaires industrielles** à vocation recherche affirmée comme la chaire de PSA Peugeot Citroën.
- Les **SCR entre opérateurs de la recherche académique et centres techniques** en vue d'améliorer les compétences des centres techniques sur enjeux scientifiques et techniques.

[61] *Mission sur les dispositifs de soutien à la recherche partenariale*, Rapport interministériel, Février 2013

[62] *Le positionnement et les perspectives stratégiques des nanotechnologies en France,* Rapport pour la DGRI, Service de l'innovation et de l'action régionale et Bureau de la recherche et développement en entreprise, Dominique Foray Stéphane Lhuillery Julio Raffo, Février 2010.

Un programme porté par l'Agence National pour la Recherche (ANR) pour la création de LabCom, des laboratoires communs entre académiques et PME, ETI ou EPIC, favorise les partenariats bilatéraux. Ils sont caractérisés par une gouvernance commune, une feuille de route de recherche et d'innovation, des moyens de travail permettant d'opérer en commun cette feuille de route ainsi qu'une stratégie visant à assurer la valorisation par l'entreprise du travail partenarial. On peut citer par exemple les laboratoires communs LETI-ST Microelectronics, Thales-CNRS-Paris-Sud, LETI-SOITEC, Saint Gobain-CNRS.

Enfin, d'autres modèles de coopération entre laboratoires académiques et industriels existent comme les OpenLabs ou les laboratoires internationaux mixtes entre académiques et industriels tels que la plateforme CNRS-ST Microelectronics, pour ne citer que quelques exemples.

Sans analyser leur efficacité, un rapport interministériel français publié en 2013, attire l'attention sur le risque de superposition des structures si les objectifs des sociétés d'accélération du transfert de technologies (SATT) sont maintenus avec un ciblage de rentabilité à court terme[35]. Il est important de souligner que ces dernières ont mis un accent fort sur le redéploiement de l'industrie française à travers l'innovation et la valorisation. Celui-ci a sous-tendu la réorganisation de la stratégie de la recherche avec la mise en place d'Alliances, la création de filières industrielles, la déclinaison en défis sociétaux des appels à projets de l'ANR et les 34 plans de reconquête industrielle.

La mondialisation de la recherche

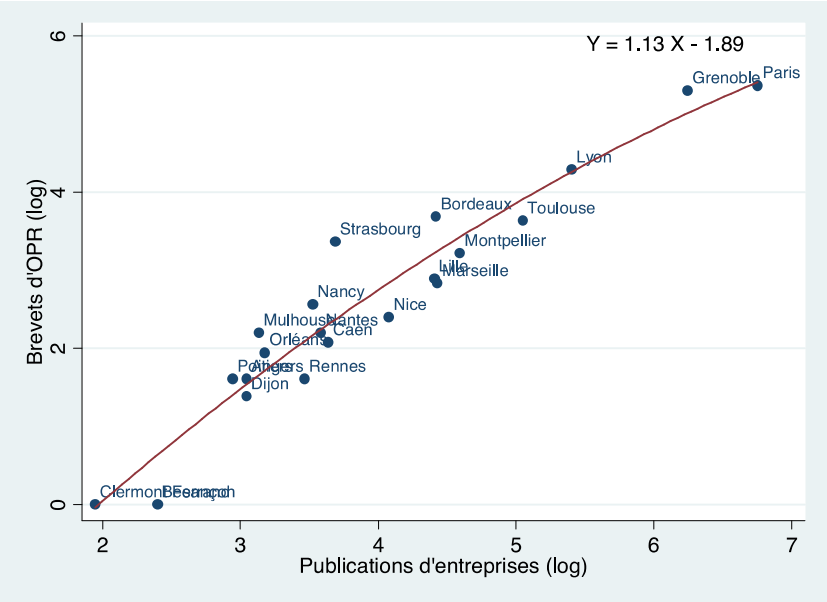
A l'échelle européenne, des partenariats et passerelles entre les entreprises et les universités (IAPP, *Industry Academia Partnerships and Pathways*) ont été mis en place. On peut constater qu'un rapprochement académie-industrie est recherché dans le domaine des nanomatériaux. Une difficulté majeure est toutefois soulignée à la fois par le monde académique et le monde : force est de constater que l'Europe a décroché en termes de R&D, d'innovation, de brevets et de renouvellement du tissu industriel, par rapport aux Etats-Unis ou au Japon. Par conséquent, la concurrence est très forte entre les différents laboratoires et instituts internationaux d'un même domaine. Les entreprises n'hésitent pas à faire leur marché en dehors de leur pays de rattachement, dès lors que les règles en matière de propriété intellectuelle, ne sont pas bloquantes dans le processus.

Dans le programme H2020, la primauté industrielle sur les Nanotechnologies, Matériaux et Production (NMP) du programme H2020 privilégie les projets de TRL supérieur ou égal à six. Compte tenu du fait que de tels projets se situent à un niveau proche de la commercialisation, ceci pose de nombreux problèmes de conflit d'intérêt et de concurrence aussi bien au niveau de l'interface académie-industrie qu'entre industriels (voir variable 5 « *Relations entre acteurs industriels* ») et constitue ainsi un frein au développement de ces interfaces.

Or, dans le même temps, de nouveaux défis technologiques sont apparus en termes de :

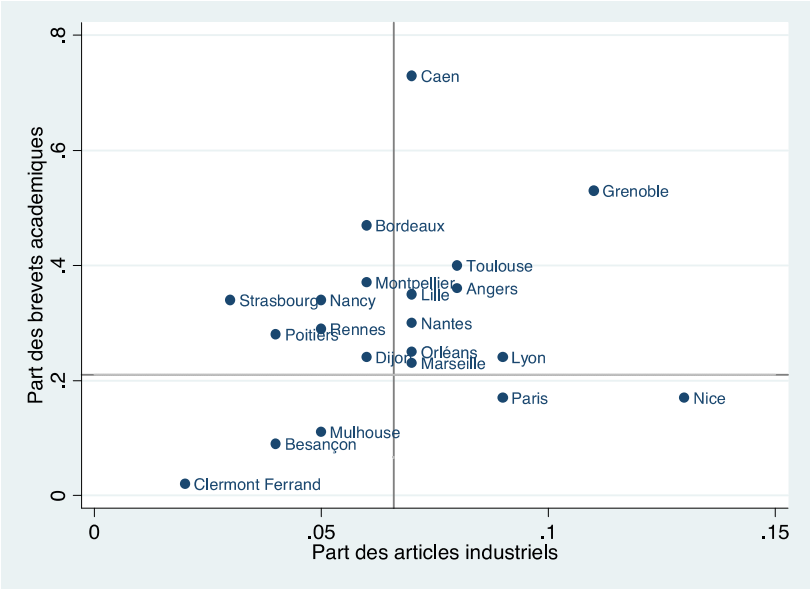
- Diffusion des technologies de l'information et de la communication
- Avancées des biotechnologies (génomique, protéomique, etc.)
- Technologies liées à la protection de l'environnement
- Maintien ou développement de sources d'énergie sûres, compétitives et non polluantes

Face à cette évolution, les gouvernements européens ont pris comme résolution de renforcer le soutien à l'effort de R&D industrielle, afin de recoller aux chiffres des USA et du Japon.



Élaboration propre à partir des données Scopus (1996-2008) et PATSTAT (1990-2004). Toutes les requêtes confondues appliquées aux deux sources. Seulement les adresses des inventeurs ont été prises en compte. Échelle X et Y en logarithmes : pente de 1% de publications académiques supplémentaires va correspondre à 1.13% de brevets supplémentaires.

Figure 27 : Corrélation entre nanoscience industrielle et nanotechnologie académique



Élaboration propre à partir des données Scopus (1996-2008) et PATSTAT (1990-2004). Toutes les requêtes confondues appliquées aux deux sources. Seulement les adresses des inventeurs ont été prises en compte.

Figure 28 : Poids de la nanoscience industrielle et de la nanotechnologie académique, par cluster

Prospective

Comme mentionné plus haut, le chiffrage des indicateurs reste difficile. On peut constater que le nombre de publications industrielles intégré sur la période 1996-2008, est fortement corrélé au nombre de brevets académiques et ce dans toutes les villes françaises[35] (**Figure 27**). Ceci reste le cas si les publications et les brevets sont réalisés à l'intérieur d'un cluster (**Figure 28**). On peut cependant constater des différences entre clusters qui pour la plupart reflètent soit leur modèle soit leur histoire.

Un indicateur indirect peut également être trouvé en comparant le rapport nombre de brevets par article. On peut constater que ce rapport augmente pour la France au cours des dix dernières années. La France se retrouvant désormais autour de la 12ème place mondiale mais reste néanmoins en dessous de son classement plus académique que sont les indicateurs nombre de publications ou facteur d'impact[63].

Tendances lourdes

Manque d'organisation des acteurs de la chaîne de valeur en NST

Le chaînon entre les différents acteurs reste à développer pour la faisabilité du passage de la preuve de concept en produit. Le manque de fabriquant est un fait avéré et reconnu par la majorité des acteurs de la chaîne de valeur en NST. D'autre part, il existe un manque de visibilité des bons interlocuteurs dans l'écosystème d'innovation. Le manque de personnel technique dédié au partenariat académie-industrie est aussi problématique pour la consolidation de la chaîne de valeur.

Stratégies de recherche publiques et industrielles

On retrouve une multiplication significative à partir de 1999 des dispositifs d'incitations financières issues des politiques publiques (soutiens financiers pour la recherche, organismes de valorisation, etc.) : CIR, projets ANR, programmes collaboratifs, IRT, Carnot, FUI, PSPC, IAPP. Les programmes de financements sont orientés vers des projets spécifiques. A l'inverse, le processus d'innovation est en pleine mutation dans l'industrie (voir variable 3 « *Pilotage de la recherche et de l'innovation* »). Les entreprises ne peuvent plus reposer sur leurs seules recherches internes pour innover et développent donc une stratégie d'innovation externe (par des acquisitions, des partenariats, ou des licences sur des produits). La montée vers des niveaux de maturation technologiques élevés pour les projets du programme européen H2020 pousse les industries à investir vers des projets d'innovations incrémentales.

Formation et insertion des docteurs dans l'industrie

On remarque également un déficit d'attractivité des laboratoires académiques pour les étudiants sur les thématiques très applicatives. La frilosité concernant le recrutement des docteurs par les industriels explique le manque d'attractivité des formations doctorales et la faiblesse du lien entre académie et industrie.

Incertitudes majeures

Impact des dispositifs d'incitation à l'innovation

L'impact des dispositifs d'incitation à l'innovation reste relativement opaque. De la même manière, les effets provoqués par la superposition de ces dispositifs ne sont pas encore bien connus mais la multiplication des initiatives induit un manque de clarté pour les acteurs de la chaîne de valeur.

[63] NanoStat

Financement et écosystème de l'innovation

La conservation d'une capacité d'investissement en R&D au sein des entreprises françaises reste une incertitude majeure. L'écosystème français devra répondre aux besoins de la chaîne de valeur industrielle pour être innovant. Ainsi, le tissu industriel français pourrait être amené à la délocalisation.
L'intégration des « nano » dans le roadmap des PME et des grands groupes n'est pas évidente dans un contexte d'évolution rapide des nouvelles technologies.

Diffusion des savoir-faire

La connaissance et le partage des approches méthodologiques entre différents secteurs est peu développé à ce jour. De plus, il n'y a pas de convergence totale sur l'appellation « nano » entre industriels et académiques.

Hypothèses prospectives

La rétrospective précédente et les signaux d'évolution de la variable font ressortir trois facteurs ayant un impact majeur pour les relations Académie-industrie dans les NST:

- le niveau de compétitivité des équipes académiques (laboratoires et instituts de recherche), incluant leur niveau de performance et leur réactivité pour un coût attractif. Ce facteur est dépendant des 2 suivants
- la capacité d'investissement en R&D des entreprises
- l'évolution des dispositifs publics d'incitation à la R&D en NST

Même si ces trois facteurs ne sont pas totalement indépendants, on peut relever les interactions croisées suivantes :

		Evolution des dispositifs publics d'incitations pour la R&D en N&N	
		Faible	Forte
Capacité d'investissement en R&D des entreprises	Faible	**Danger !!!**	R&D financée par l'Etat Préparation de l'amont
	Forte	R&D orientée appli/industrie. Les industriels font leur marché (France, Europe, international)	+++ Attention toutefois à la concurrence !

		Niveau de compétitivité des équipes académiques	
		Faible	Forte
Capacité d'investissement en R&D des entreprises	Faible	---	R&D à destination de l'étranger ?
	Forte	Les industriels vont chercher la R&D à l'étranger !	+++

		Evolution des dispositifs publics d'incitations pour la R&D en N&N	
		Faible	Forte
Niveau de compétitivité des équipes académiques	Faible	---	Stratégie de R&D à revoir
	Forte	Moyens & équipes rationalisés mais efficaces	+++

A partir de ces interactions, quatre hypothèses peuvent être formulées :

Hypothèse 1 : Renforcement des couplages académie – industrie en France aussi bien en nombre qu'en typologie

Causes possibles **:**

- Confiance grâce à des relations claires basées sur un consensus éclairé sur la propriété intellectuelle
- Résultats de la recherche publique au premier rang international
- Renforcement des dispositifs publics d'incitations financières, d'animation et de valorisation
- Politique nationale volontaire de création de filières « nano »

Hypothèse 2 : Maintien à un niveau modéré de la relation académie – industrie

Hypothèse 3 : Dégradation de la relation académie – industrie

Causes possibles :

- Supériorité/concurrence des acteurs internationaux de la recherche
- Faiblesse (réduction, budgets réduits,…) des dispositifs publics d'incitations financières
- Absence en France d'une politique nationale industrielle

Hypothèse 4 : Renforcement des relations académie-industrie sur des secteurs ciblés

Causes possibles **:**

- Focalisation industrielle sur des secteurs ciblés
- Politique sectorielle ciblée
- Concurrence étrangère trop forte
- Bonne détection de signaux faibles
- Montée en puissance de l'offre académique envers les industriels

VARIABLE V5 « RELATIONS ENTRE ACTEURS INDUSTRIELS »

Rédacteurs : Gérard BERGINC (Thales Optronique), Stéphane DELALANDE (PSA Peugeot Citroën), Elodie THACHIL (CNRS- C'Nano), Ariel LEVENSON (CNRS- C'Nano)

Définition de la variable et indicateurs

L'objet de ce document de travail est de déterminer l'évolution des relations interindustrielles au cours du développement des nanosciences et nanotechnologies (NST) et d'identifier la nature de ces interactions ainsi que leurs impacts sur l'émergence ou la consolidation d'une filière « nano », la notion de filière pouvant être comprise au sens large, au sens de filière sectorielle ou transversale.

La relation fournisseur-utilisateur est cruciale pour le développement, à long terme, d'innovations de rupture utilisant les NST. C'est précisément dans cet horizon de rupture technologique ou d'usage que les acteurs placent le plus fréquemment le rôle de ces nouvelles technologies. Ces relations supposent un climat de confiance afin d'identifier le cahier des charges et des savoir-faire en NST. Il ne s'agit pas de relations commerciales classiques mais d'échanges collaboratifs, de *brainstorming*, de recherche ou développement entre les différents acteurs. L'intérêt de ces interactions réside dans la réflexion collective sur les demandes et les futurs besoins dans le but de créer des innovations de rupture. Elle nécessite ainsi une coordination optimale des différents fournisseurs du rang 1 au rang n jusqu'à l'utilisateur final. De par l'importance de la notion de rupture, la relation fournisseur-utilisateur en NST n'est pas exogène à l'interface académie-industrie ni à l'endroit de la filière où cette interface se développe ou ne se développe pas (voir variable 4 « *Relations académie-industrie* »).

Plusieurs indicateurs peuvent évaluer ce dialogue : les programmes de recherche créés et lancés par les utilisateurs finaux et les fournisseurs systémiers ainsi que les programmes nationaux et européens impliquant ces acteurs permettent d'évaluer le niveau d'échange entre les acteurs de la chaîne. Il faut noter que l'accent est mis ici sur les étapes pré-commerciales, c'est-à-dire les niveaux de maturité technologique (TRL) peu élevés, au-delà desquels les enjeux de rupture technologique sont quasi inexistants et les relations revêtent un caractère purement commercial.

Rétrospective

La chaine d'acteurs des NST

En 2000, les acteurs de la filière « nano » étaient peu visibles. Les enquêtes de l'époque montrent que certaines industries produisaient, parfois sans le savoir, des nanomatériaux pour modifier et optimiser des produits. Il n'y avait pas de réflexion entre utilisateurs et fournisseurs sur une filière « nano » car il n'y avait pas de prise de conscience de la demande en nanomatériaux, exception faite des filières comme la microélectronique pour lesquelles la loi de Moore permet d'extrapoler le besoin de miniaturisation.
Depuis, la percée des technologies dites « nano » dans des secteurs très variés allant de la santé, l'énergie, le transport, l'environnement aux cosmétiques ou l'habillement, a mis en lumière l'émergence d'acteurs industriels ou de services au sein des grands groupes spécialisés sur des aspects « matériaux » ou « instrumentations appliquées aux NST » ou d'interfaces industrie-industrie ou industrie académie nouvelles. L'étude réalisée en 2004 par la Direction Générale de l'Industrie, des Technologies de l'Information et des Postes (DiGITIP)[64] sur les nanomatériaux en France a fait ressortir la nécessité de

[64] *Etude prospective sur les nanomatériaux*, Développement & Conseil, pour le compte de la DIGITIP, Mai 2004

mailler les acteurs et d'intégrer les compétences amont-aval afin de mieux comprendre les besoins non satisfaits de l'industrie et de mieux connaître les larges possibilités qu'offrent les nanomatériaux.
Certaines bases de données ont été mises en place dans le but de faciliter les échanges entre acteurs. C'est le cas de la Nanotechmap[65] développée par la start-up *Nanothinking* ou encore de la base de données du DIGITIP.
Depuis 2010, un début d'organisation des acteurs de la *Global value stream* s'est créée (**Figure 29**), déclenchant une augmentation de l'utilisation des nanomatériaux sur les produits. Mais, il existe encore aujourd'hui une réelle distorsion entre les laboratoires de recherche industriels et académiques, les producteurs, les transformateurs et les utilisateurs finaux.

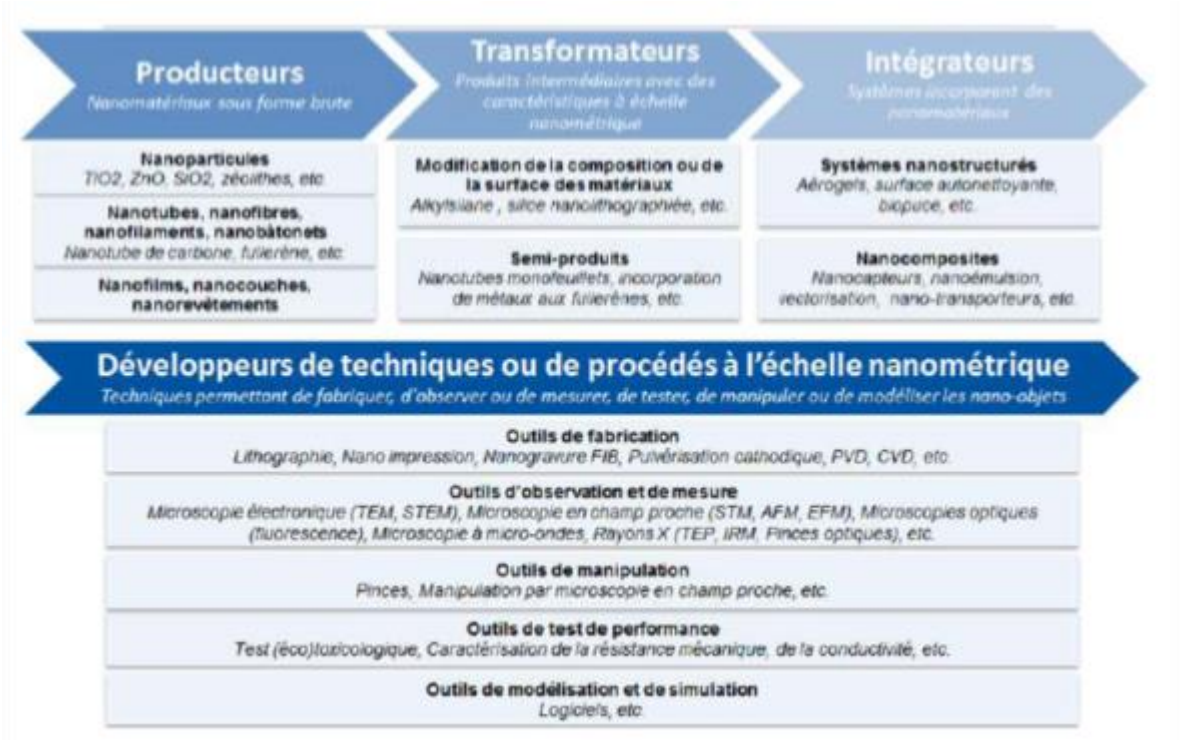


Figure 29 : Chaine de valeur industrielle en NST

Les nanotechnologies sont utilisées dans des domaines d'applications extrêmement variés. A présent, il n'existe pas d'organisme ni d'organisation structurant ou coordonnant les entreprises utilisant ou travaillant sur les nanotechnologies[66].

Stratégies d'innovation des industriels

Parallèlement, depuis 20 ans, les investissements dans la R&D en NST diminuent significativement. Le développement de la concurrence industrielle des pays émergents nécessite une stratégie industrielle basée sur des objectifs de rentabilité à court terme pour permettre aux entreprises européennes de conserver leur part de marché, ce qui ne favorise pas les conditions propices à l'innovation de rupture qui elle nécessite des investissements à plus long terme. De nos jours, la stratégie industrielle privilégie donc le

[65] www.nanothinking.com
[66] *Enjeux et défis de l'industrie des nanotechnologies en Île-de-France*, Direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement, 2010

développement d'innovations incrémentales plutôt que celui d'innovations de rupture nécessitant un investissement et une anticipation importants non compatibles avec la concurrence à court terme.

Or, un pan important de l'apport des nanotechnologies s'inscrit dans des innovations de rupture, soutenues par des volumes financiers qui peuvent être importants et constants dans le temps. Actuellement, il n'y a pas d'investissements suffisants pour développer des réseaux d'industriels, qui permettent aux acteurs de réfléchir ensemble sur les demandes des utilisateurs en NST et de créer les savoir-faire nécessaires en R&D. Cela se traduit par un manque d'instances pour formaliser ces échanges et par l'incertitude sur la consolidation de la filière « nano ».

Certains groupes français comme L'Oréal, investissent massivement dans la recherche fondamentale impliquant les NST avec un budget de près de 900 millions de dollars en 2012. L'entreprise dispose de 188 brevets en NST déposés à l'USPTO depuis 1991 dont 5 déposés durant l'année 2011[67].

Au niveau européen, la stratégie qui a été choisie est celle consistant à activer la mise sur le marché de technologies innovantes positionnées à des niveaux de maturité technologique atteignant au moins les niveaux de maturité technologiques (*Technology Readiness Level,* TRL) 6 ou 7 c'est à dire très proches de la commercialisation des produits. Ainsi, cette volonté politique favorise le développement des technologies déjà matures et non les étapes de recherches fondamentales, nécessaires à la découverte de technologies de rupture. La stratégie de l'Europe cible donc le court terme et est concentrée sur le marché des produits matures au détriment des projets de recherches technologiques situés en amont. Elle ne favorise de ce fait pas les relations entre industriels compétitifs à ces niveaux de TRL, ni les relations académie-industrie.

L'obligation de résultat à court terme pour les Services d'Accélération de Transfert Technologiques (SATT), identifiée comme une entrave à l'efficacité de l'innovation[35], ne favorise pas le développement des interfaces que ce soit entre industriels ou entre industriels et académiques.

Interactions entre PME et grand groupes

Selon la Direction régionale de l'Industrie, de la Recherche (DRIRE), les PME franciliennes en NST ne parviennent pas à créer des partenariats avec les grands groupes français entrainant une prise de risque pesant sur les PME. Le lien avec des entreprises étrangères seraient, quant à lui, parfois plus facile à mettre en place pour les PME franciliennes. Plus généralement le risque de pillage de la propriété intellectuelle (PI) est souligné, notamment dans le rapport interministériel français publié en 2013[35].

La plupart des PME est très majoritairement en phase de R&D avec un chiffre d'affaire faible. Elles doivent donc trouver d'autres sources de financement : des fonds d'investissements, des partenariats commerciaux, des financements publics de la R&D. Elles soulignent d'autre part un manque d'implication des capitaux-risqueurs français[66]. Elles seraient alors contraintes de s'adresser à des fonds d'investissement étrangers.

[67] *Global nanotechnology development from 1991 to 2012: patents, scientific publications, and effect of NSF funding,* Hsinchun Chen & al, Journal of Nanoparticle Research, 2013

Etude prospective

Tendances lourdes

Manque d'organisation des acteurs des filières « nano »

Le manque de visibilité des acteurs ne permet pas aux industriels d'identifier les bons interlocuteurs de l'écosystème d'innovation et tout particulièrement les fournisseurs. Elle est liée à une trop faible organisation des acteurs au sein de filières « nano ».
Le nombre restreint de plateformes de transfert industriel existant en France engendre un manque d'études de faisabilité permettant de produire des prototypes à partir des preuves de concept et constitue un maillon manquant dans la chaîne de valeur. Une des conséquences de ce manque d'organisation est l'appauvrissement progressif de la chaîne de valeur « nano ».

Transfert partiel des investissements en recherche en développement au profit d'objectifs à court terme

Depuis 20 ans, les stratégies industrielles se sont progressivement orientées vers des objectifs à court terme, se focalisant en priorité sur le développement et moins sur la recherche technologique fondamentale. Ce type de stratégie favorise les projets d'innovation incrémentale à défaut des projets d'innovations de rupture.

Les appels à projets ciblent les projets matures

Les appels à projets européens se sont déplacés vers des niveaux de maturité technologique élevés (TRL6-7) correspondant à des phases matures du développement industriel. Ce constat est perçu par la grande majorité des industriels français comme un frein à la recherche technologique. Toutefois certains grands groupes y voient des opportunités de commercialisation à court terme.

Déficit d'ETI sur le territoire français

Les entreprises de taille intermédiaire (ETI) représentent un des leviers majeurs de la reconquête industrielle. En France, elles sont malheureusement très peu nombreuses. Le tissu des entreprises françaises manque d'entreprises de taille suffisante pour être compétitives sur les marchés étrangers, contrairement aux économies avancées comme l'économie allemande, ou bien innovantes, comme l'économie américaine[68]. Par leur taille et leur souplesse, les ETI disposeraient d'avantages compétitifs dans la conquête notamment de marchés de niches ou innovants[69].

Des grands groupes étrangers non-européens investissent dans l'acquisition de start-up en NST « nanotech »

En France, le manque d'interaction entre les grands groupes et les nanotech françaises a pour conséquence d'attirer ces dernières à nouer des partenariats avec des grands groupes à l'étranger. Les grands groupes comme Google, Apple, Samsung sont suffisamment puissants financièrement pour faire l'acquisition de start-up en NST afin d'acquérir rapidement de nouvelles technologies. D'autre part, ils sont intéressés par les avantages apportés par les NST dans leurs produits sans pour autant forcément produire eux-mêmes les nanomatériaux nécessaires.

---

[68] *Mittelstand : notre chaînon manquant*, Rapport du Conseil d'analyse économique franco-allemand, Stoffaës C., 2008
[69] *Les entreprises de tailles intermédiaires*, Dossier INSEE, 2009

Les incertitudes majeures

Il existe une incertitude quant à la capacité de nouer des relations de la R&D collaborative entre les acteurs de la chaîne de valeur. Bien que la création de relations fournisseurs-utilisateurs soit cruciale pour le développement d'innovation de rupture, celles-ci ne sont pas favorisées dans le contexte actuel et les relations sont actuellement plutôt commerciales.

La capacité de prise de risque par les industriels en investissant dans de l'innovation de rupture est un des grands inconnus. Cette prise de risque est pourtant cruciale pour la pénétration de solutions nanotechnologiques. Or la tendance actuelle va vers de l'innovation incrémentale qui vise un profit à court terme.

La pérennité des partenariats grands groupes et PME/start-up est encore une incertitude.

Hypothèses prospectives

Hypothèse 1 : Fédération des filières émergentes françaises sous l'impulsion d'un grand donneur d'ordre

Hypothèse 2 : Transfert des filières émergentes à l'étranger par les grands groupes

Hypothèse3 : Création d'un environnement dynamique en Europe pour les grands groupes et les PME, favorisant la fédération des filières émergentes

Hypothèse 4 : Relations entre industriels mais sans affichage « nano » clair

5.3.4- Variable V6 « Formation et Diffusion du savoir en Nanosciences et Nanotechnologies »

Rédacteurs : Raphaëlle JARRIGE (CNRS- DIM nanoK), Anne-Sophie SALVETAT (CBMN, C'Nano)

Avec la participation de : Elodie THACHIL (CNRS- C'Nano), Julie CARIMALO (CNRS- C'Nano), Ariel LEVENSON (CNRS- C'Nano)

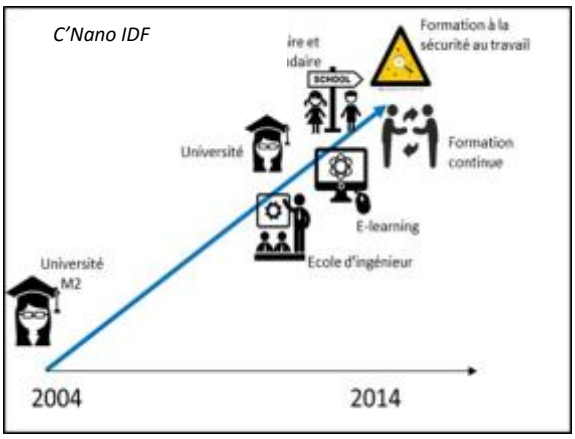
Définition de la variable et indicateurs

Cette fiche variable traite des différents niveaux de formations dans les domaines des nanosciences et nanotechnologies (NST). Cet ensemble constitue un vaste continuum allant du primaire au tertiaire, à la formation professionnelle, à la formation par la recherche en passant par les actions de formation et de dissémination des savoirs. Il recouvre donc des publics nombreux et variés et des acteurs très divers. Cette variable présente donc des liens forts avec les aspects emploi et métiers traités dans les fiches sur les variables V2 et V7, respectivement. La formation doit anticiper le besoin en personnels en Recherche, développement et innovation (R&D&I) et pouvoir répondre à de nouvelles problématiques soulevées liées aux interfaces entre différentes disciplines, à l'interaction science-société, à la métrologie à l'échelle nanométrique, à la compréhension des cycles de vie, etc.

Les indicateurs pertinents pour cette variable incluent le nombre d'offres de formation, le type de public touché (par âge, discipline et activité professionnelle) et le nombre de nouveaux outils de formation développés.

Rétrospective

Dans certains domaines de la recherche, aujourd'hui pleinement associés aux NST, on aime à dire que, il y a plus de trente ans « *on faisait des nanos sans le savoir* ». On pourrait en dire autant des formations tertiaires. Les formations en chimie, physique des solides et des interfaces, par exemple, proposent depuis longtemps des cours qui touchent aux aspects « nano ». Cependant, d'un point de vue plus global, l'offre de formation labélisée « nano » est très récente (moins d'une dizaine d'années) et se développe considérablement. Ce développement concerne à la fois les aspects quantitatifs (nombre de formations, d'étudiants) que qualitatifs (diversité des formations, public touché, pluridisciplinarité, etc.)



Au début des années 2000, les formations proposées concernaient essentiellement des cursus de niveau Master II à l'université. Ces dernières années, est apparue une diversification importante des formations sur les NST vers un public, lui aussi, varié. Le contenu de ces nouvelles formations tend vers une spécialisation. On peut noter également la multiplication des initiatives originales de formation et d'information, avec une approche plus transverse au niveau du public et des communautés scientifiques.
Les polémiques associées aux NST qui ont accompagné le début des années 2000 (voir fiche Variable 8 « *Perception des NST* ») n'ont donc nullement constitué un frein à l'affichage de l'appellation « nano » ni à la création des nouvelles formations.

Les différents niveaux d'enseignement

Education formelle – cadre traditionnel de la pédagogie

Lycée

En classe de Seconde, le programme contient un chapitre sur l'étude de l'univers avec l'infiniment petit et l'infiniment grand, et un deuxième sur les atomes. Le terme « nano » et sa grandeur (1 nm = 10^{-9} m) y sont abordés. Des modules sur les nanosciences peuvent se retrouver dans certains des enseignements d'exploration choisis par les élèves de seconde (« MPS », « Sciences de l'ingénieur », « Sciences et Labo »).
En Première Scientifique, on retrouve, dans le chapitre « *Agir, défis du XXIe siècle* » inscrit au programme | BO du 30 septembre 2010, un volet « *Nanochimie* » abordant la synthèse des molécules et la fabrication de nouveaux matériaux : nanotubes de carbone, nano-médicaments, nanoparticules métalliques, etc. En Terminale Scientifique, les nanosciences sont au programme depuis 2012 dans l'enseignement de la spécialité physique-chimie (BO du 13 octobre 2011).

Enseignement Supérieur

En licence, les nanosciences sont le plus souvent enseignées sous forme de modules de spécialisation. On peut noter également l'existence d'une Licence Pro avec des enseignements en nanotechnologies. En 2007, on comptait 18 masters (recherche et professionnel)[70] s'affichant « nanosciences » alors qu'en 2013 leur nombre augmente à 35 (**Table 1**). A l'échelle européenne, sans compter la France, on comptabilise en 2013 près de 30 masters (**Figure 30**). Ces Masters « nano » sont par essence pluridisciplinaires. Le défi de ces formations tient à la nécessité de couvrir un spectre large de connaissances sans sacrifier l'obtention de connaissances de base dans au moins une des disciplines.

On peut noter également que la Coordination Nationale de la Formation en Microélectronique et nanotechnologies (CNFM) participe à des actions de formation en micro et nanoélectronique avec ses plateformes mutualisées sur un ensemble d'établissements supérieurs. A ce jour, peu de formations spécifiques en nanosciences sont mises en place dans le cursus ingénieurs. Le plus souvent, il s'agit de collaborations entre écoles d'ingénieurs et universités afin de créer des masters spécialisés.

Au niveau de la formation par la recherche, 34 Ecoles Doctorales recensent une composante « nano » (**Table 2**). Ces structures couvrent l'ensemble du territoire français et représentent une grande diversité de disciplines. Chaque année, il y a à peu près 20% des thèses scientifiques, hors thèse de médecine, qui relèvent des nanosciences. Ceci crée un véritable vivier de professionnels en NST pour les industries et les laboratoires académiques. Le nombre de bourses CIFRE concernées par les NST n'a quant à lui pas encore été déterminé.

Education formelle – les technologies numériques

L'enseignement de masse en ligne (MOOC, *Massive Open Online Courses*) est un type de formations en ligne gratuit dispensé par les meilleures universités du monde et aboutissant à un certificat reconnu. A l'étranger, les cours numériques sur les NST ciblent un public scientifique (souvent des doctorants). En France, il n'y a actuellement pas d'enseignement en ligne sur les NST.

[70] *Les enjeux de la formation en nanosciences et en nanotechnologie,* Sylvie Retailleau, 2007

Nord-Ouest et Nord
Master 2 « *Chimie* », Spécialité « *Matériaux, nanosciences* », Université de Caen
Master 2 « Sciences de la matière – nanosciences », Université de Rouen
Master 2 « *Nanomédecine* », Spécialité « *Innovation et transfert* », Université d'Angers
Master 2 « *Chimie fine, matériaux fonctionnels et nanosciences* », Université d'Angers
Master « *Physique des matériaux et nanostructures* », Université de Poitiers
Master « *Microélectronique, nanotechnologies et télécom* », Université de Lille
Est
Master « *Matériaux et nanosciences* », Université de Strasbourg
Master « *Physique, spécialité matière condensée et nanophysique* », Université de Strasbourg
Master « *Sciences et technologies* », Mention « *Sciences pour l'ingénieur* », Spécialité *« Micro- et nano électronique* », Université de Strasbourg
Master « *Nanosciences optique atmosphère* », Université de Reims
Master « *Matériaux et sciences pour l'ingénieur* », Spécialité « *Matériaux nanostructurés, surfaces et interfaces* », Université de Reims
Master 2 mixte « *Nanotechnologies et nanobiosciences* », Université de Bourgogne (depuis 2001, alors DESS en nanotechnologies, puis 2004 pour le Master)
Master « *Mécanique et Physique* », Spécialité M2 « *Optique et nanotechnologies* », Université de technologie de Troyes
Master « *Physique* » Spécialité « *Matière condensée et nanophysique »,* Université de Lorraine
Master « *BioSciences et Ingénierie de la Santé* », Parcours « *BioIngénierie Médicament NanoSanté* », Université de Lorraine
IdF
Master 2 « *Nanosciences* », Université Paris-Sud / Ecole centrale Paris / Polytechnique / IOGS / Supelec / ENS Cachan / Université Versailles
Master 2 « *Sciences des matériaux et nano-objets* », Universités Paris 6 et 7 / ENS Ulm et Cachan / Ecole Polytechnique / ENSCP / ESPCI
Master 2 *« Nanochimie, matériaux, surfaces* », Université Paris 7
Master 2 « *Surfaces, couches minces et nanomatériaux* », Université Paris 7
Master 2 « *Physique et nanotechnologies* », Université Paris 13 / CNAM
Master 2 « *Nanobiomatériaux* », Université d'Evry
Master 2 « *Surfaces et nanomatériaux* », Université d'Evry
Master Erasmus « *Molecular nano and biophotonics in télécommunications and biotechnologies* », ENS Cachan
Sud-Ouest
Master 2 « *Nanomatériaux et multi-matériaux* », Université Paul-Sabatier Toulouse / INP / INSA, SupAéro
Master 2 « *Nanosciences, nanocomposants, nanomesures* », Université Paul-Sabatier Toulouse / INP / INSA
PACA
Master 2 « *Matériaux* », Spécialité « *Matériaux avancés pour les nanosciences et l'énergie* », Université Aix-Marseille, Master recherche
Master « *Micro et nanoélectronique* », Université d'Aix-Marseille
Master 2 « *Nanophysique* », Université de Montpellier
Master 2 « *Physique et ingénierie des matériaux pour la micro-électronique et les nanotechnologies* », Université de Montpellier
Master 2 « *Electronique, photonique, nanotechnologie* »
Rhône-Alpes
Master « *Nanosciences, nanotechnologies* » (4 spécialités en master 2 : nanophysique - nanostructures, nanochimie – nano-objets, nanobiologie – nanobiotechnologies, ingénierie des micro- et nano-structures), Université de Grenoble (public étudiant et formation continue)
Master « *Micro-nano* », Université Claude-Bernard Lyon / ECL / INSA / ENSL
Master 2 « *Développement instrumental pour les micro- et nano-technologies* », Université Claude-Bernard Lyon
Master 2 « *Nanostructures et nanophotonique* », Université Blaise-Pascal Clermont-Ferrand

Table 1 : Liste des formations Master par région recensées en France (*Source : Données du réseau C'Nano)*

ED34	**ECOLE DOCTORALE MATERIAUX DE LYON**	INSA de Lyon
ED37	**SCIENCES PHYSIQUES POUR L'INGENIEUR ET MICROTECHNIQUES**	Besançon
ED47	**ECOLE DOCTORALE DE PHYSIQUE DE GRENOBLE**	Université Joseph Fourier (Grenoble 1)
ED52	**PHYSIQUE ET ASTROPHYSIQUE DE LYON (PHAST)**	Lyon 1
ED72	**SCIENCES POUR L'INGENIEUR (SPI)**	Université des Sciences et technologie de Lille 1
ED107	**Ecole doctorale de Physique de la Région Parisienne**	ENS/UPMC/UP11/UP7
ED166	**INFORMATION, STRUCTURES ET SYSTEMES (I2S)**	Université Montpellier 2
ED182	**PHYSIQUE ET CHIMIE-PHYSIQUE**	Université de Strasbourg
ED218	**CHIMIE ET SCIENCES DU VIVANT**	GRENOBLE 1
ED220	**ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE, TRAITEMENT DU SIGNAL**	GRENOBLE INP
ED222	**SCIENCES CHIMIQUES**	Université de Strasbourg
ED 285	**SCIENCES PRATIQUES**	ENS Cachan
ED288	**ECOLE DOCTORALE ONDES ET MATIERE**	Université de Paris-Sud et Institut d'Optique Graduate School
ED352	**PHYSIQUE ET SCIENCES DE LA MATIERE**	Aix-Marseille Université (AMU)
ED353	**SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR : MÉCANIQUE, PHYSIQUE, MICRO ET NANOÉLECTRONIQUE**	Aix-Marseille Université (AMU)
ED361	**Science et Technologie de l'information et de la communication**	Université de Technologie de Troyes (UTT)
ED388	**Chimie physique et chimie analytique de Paris**	Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)
ED397	**PHYSIQUE ET CHIMIE DES MATÉRIAUX**	Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)
ED406	**Chimie Moléculaire de Paris-Centre**	Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)
ED422	**SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION, DES TELECOMMUNICATIONS ET DES SYSTEMES**	Université Paris Sud (Paris 11)
ED425	**Innovation thérapeutique**	Université Paris Sud (Paris 11)
ED435	**ABIES (Agriculture, Biologie, Environnement, Santé)**	AGRO ParisTech/ Fédération IdF de Recherche sur l'Environnement
ED436	**"Médicament, Toxicologie, Chimie, Imageries"**	UP7 et UPDescartes
ED447	**Graduate School EDX**	Ecole Polytechnique/ENSTA
ED 458	**SCIENCES ECOLOGIQUES, VETERINAIRES, AGRONOMIQUES ET BIOINGENIERIES**	Toulouse 3
ED470	**Chimie de Paris Sud**	Université Paris Sud
ED482	**Sciences de la Matière**	Université Paul Sabatier (Toulouse 3)
ED518	**Matière condensée et interfaces**	Université Paris Diderot/Université Paris Sud
ED521	**SCIENCES ET INGÉNIERIE POUR L'INFORMATION, MATHEMATIQUES (S2I)**	Limoges
ED532	**OMI Organisations, Marchés, Institutions**	UPEST
ED539	**SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE VERSAILLES**	UVSQ

ED552	**ENERGIE - MATÉRIAUX - SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS**	Orléans
ED553	**CARNOT-PASTEUR**	Dijon
ED564	**PHYSIQUE EN ILE DE FRANCE**	PSL

Table 2 : Liste des Ecoles Doctorales françaises présentant des thèses ayant une composante « nano » (*Source : Données du réseau C'Nano)*

Figure 30 : Cartographie au niveau européen des Masters en nanosciences et Nanotechnologies
Source : Nanosciences et Nanotechnologies : Evolution ou révolution, J.-M. Lourtioz, M. Lahmani, C. Dupas-Haeberlin, P. Hesto, 2014, Ed. Belin

Formations professionnelles

Formation initiale et continue des enseignants

Différentes initiatives proposent des formations pour les enseignants. La plus importante a été lancée par le dispositif NanoInnov incluant les pôles Nano-Ecole de Paris, Toulouse, Lille et Nano@School pour le pôle de Grenoble. Ainsi, la Nano-école de Toulouse forme plus de 60 professeurs par an. Pour l'année scolaire 2014-2015, une formation d'environ 20 heures a également été créée au sein d'un module du Master enseignant de l'ESPE de Toulouse en Physique / chimie (formation initiale).

Enfin, l'école d'été E2Phy de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, réunit pendant une semaine un public d'environ une centaine de professeurs de lycées. A plusieurs reprises, les nanosciences ont été à

l'honneur et la programmation incluant cours, visites de laboratoires et démonstrations, a été réalisée avec la collaboration du réseau C'Nano.

Formation initiale et continue des professeurs des écoles

En 2007, un module de formation sur les « *Nanotechnologies et la bio-inspiration* » a été lancé dans le cadre de l'Université d'automne « *Graines de sciences* », organisée par La Fondation *La Main à la Pâte* à l'École de physique des Houches (Haute-Savoie). Ces rencontres annuelles ont pour objectif de réunir des représentants de la communauté scientifique, des enseignants de l'école primaire ainsi que des formateurs d'enseignants (conseillers pédagogiques et maîtres formateurs) afin de réfléchir sur les modalités d'enseignement des sciences à l'école.

En 2012, la Fondation *La Main à la Pâte* a lancé un réseau de Maisons pour la Science dans les grandes universités françaises. Leur rôle est de faire de la formation continue d'enseignants. Cela s'inscrit dans le cadre d'une décision de l'Académie des Sciences d'accompagner les professeurs dans l'enseignement des sciences selon l'approche *« bottom-up »* préconisée par *La Main à la Pâte*.

Formation à la sécurité au travail

Les salariés travaillant dans les laboratoires peuvent fréquemment être exposés aux nanomatériaux. Or, les connaissances portant sur la toxicité des nanomatériaux et les risques encourus sont encore fragmentaires. Il est aujourd'hui admis qu'il convient de développer des bonnes pratiques de travail et d'instaurer des procédures de prévention des risques qui soient adaptées[5]. En 2009, l'INRS a mis en place une formation « *Caractériser et prévenir les risques liés aux nanomatériaux manufacturés* » sur 2 - 5 jours. L'objectif est d'intégrer des connaissances sur les nanomatériaux en vue d'engager une démarche de prévention.

Du côté de des organismes privés, il existe très peu de formations spécifiques sur le risque des NST.

Formation par les organisations représentatives du personnel

La CFDT a publié en 2014, un livret à destination de ses adhérents sur « *Nanotechnologies – L'exigence d'un développement responsable* ». L'ambition affichée de ce guide est de peser dans les choix qui seront faits quant au développement responsable des nanotechnologies.

Diffusion des savoirs

On peut recenser de nombreuses initiatives développées par des enseignants-chercheurs, chercheurs et ingénieurs dans le but diffuser la culture scientifique dans le domaine des NST, certaines allant jusqu'à l'initiation aux débats et à l'esprit critique auprès des jeunes citoyens.

Depuis 2006, le réseau C'Nano a organisé plusieurs événements dans le cadre de la *Fête de la science*, du cycle « *Un chercheur une manip* » au Palais de la découverte, d'expositions diverses notamment le centenaire du prix Nobel Gabriel Lippmann.

L'opération nationale NanoInnov menée de 2009 à 2011 a permis de développer une action conséquente d'initiation aux NST auprès des élèves du secondaire dans 4 pôles, à savoir Lille, Toulouse, Paris (Saclay) et Grenoble. Elle a donné naissance à NanoEcole, un projet national visant à expérimenter l'introduction des NST à l'école.

Des actions de diffusion sont également menées par certains LabEx, qui développent des mallettes pédagogiques, action également réalisée avec NanoEcole.

Des démarches originales sont également conduites pour introduire la notion de débat et l'importance de l'esprit critique auprès des jeunes citoyens. On citera comme exemple l'action toulousaine en partenariat avec les professeurs du secondaire des sciences physique et sciences humaines, reconduite depuis 2006. On citera également le Nanoforum « *Les nanos dans la peau* », organisé par le C'Nano PACA en partenariat

avec six ONG, qui a réuni 300 élèves pour des visites de laboratoires, réalisation de BD et de débats dans le cadre du conseil régional de Marseille.

Prospective

Tendances lourdes

Plusieurs tendances se dégagent, à savoir :

- La montée en puissance des formations « nano » depuis une dizaine d'années principalement au niveau Master ;
- L'apparition de formations professionnelles notamment pour les professeurs de Lycée ;
- L'existence de quelques formations reliées à la sécurité au travail ;
- L'absence de formations pluridisciplinaires allant des aspects scientifiques des NST aux aspects éthiques, juridiques, santé, environnement, mis à part un cas isolé de module de formation créé par le C'Nano Ile-de-France et testé aussi bien auprès d'étudiants, d'ingénieurs et universitaires.
- La diversité d'initiatives locales de diffusion du savoir.

Incertitudes majeures

Les incertitudes majeures en termes de formation « nano » relèvent des questionnements suivants :

- Y-aura-t-il un besoin de personnel qualifié « nano »?
- Les formations « nano » proposées seront-elles attractives pour les étudiants français et étrangers ?
- Les formations « nano » seront-elles adaptées aux besoins scientifiques, sociétaux et industriels ?
- Y-aura-t-il une mutualisation optimale des savoir-faire émergents dans la diffusion du savoir et dans le domaine de la formation ?
- Y-aura-t-il un nouveau regard sur les missions des chercheurs en nanosciences ?
- Y-aura une reconnaissance des métiers de la diffusion du savoir dans la carrière des enseignants-chercheurs et chercheurs ?

Hypothèses prospectives

Hypothèse 1 : Les formations labellisées « nano » sont profondément pluridisciplinaires et spécifiques en matière de technicité.

Hypothèse 2 : La formation « nano » est un module/option d'une formation plus généraliste

Hypothèse 3 : Les formations « nano » sont dispensées principalement en formations continue et professionnelle

VARIABLE V7 « PERSPECTIVES D'EMPLOIS LIES AUX NST »

Rédacteurs : Gérard BERGINC (Thales Optronique), Ariel LEVENSON (CNRS- C'Nano), Elodie THACHIL (CNRS-C'Nano)

Définition de la variable et indicateurs

L'objet de ce document est d'identifier les perspectives d'emplois que les nanotechnologies peuvent offrir grâce à leur fort potentiel économique et en particulier grâce aux nouveaux marchés qu'elles peuvent générer.

Les indicateurs pertinents pour cette variable sont notamment le nombre d'employés dans le domaine des NST au cours du temps, puisqu'il permet d'évaluer la tendance d'employabilité dans ce domaine, la croissance des sous marchés en nanotechnologie et l'évolution des financements privés et publics qui, elles, apportent des éléments pour prédire l'évolution de la courbe de l'emploi de la prochaine décennie.

Rétrospective

Croissance de l'emploi dans la filière « nano » de 2004 à 2015

L'impact des nouvelles technologies sur l'emploi et l'employabilité a suscité de très nombreux travaux depuis la révolution industrielle. Il reste néanmoins aujourd'hui difficile de distinguer les effets sur l'emploi de l'innovation technologique de ceux purement économiques ou macroéconomiques tels que la valeur commerciale de la technologie, les cycles économiques, la localisation ou délocalisation de la production, etc.

Les NST n'échappent pas à cette règle. Certains auteurs réalisent des études à partir des produits déjà mis sur le marché pour analyser leurs traits communs leur permettant de dégager, par exemple, l'augmentation de la durée de vie sur le marché, la diminution de la matière première nécessaire, l'augmentation de l'efficacité ou la multifonctionnalité. Ils en déduisent ainsi des tendances sur l'emploi mais celles-ci sont pour le moins sujettes à caution. Les données sur l'emploi restent, elles, parcellaires car il n'y a pas de définition claire des métiers « nano » outre ceux associées à la recherche et à l'innovation, à cause de l'inexistence de filière « nano » spécifique (voir fiche variable 5 « *Relations interindustrielles* »). Enfin, du fait de leur caractère diffusif et de leur pénétration dans les industries de tout secteur, les NST semblent induire une mutation similaire à celle apportée par l'électricité, l'internet ou encore l'introduction des chaînes de montage, c'est-à-dire qu'elles génèrent des innovations qui transforment également la manière de procéder dans les industries, rendant la prédiction encore plus complexe.

Une étude réalisée en 2004 par *Lux Capital* présente une projection, probablement la plus citée, de l'évolution des emplois à la fois directs et indirects en NST entre 2004 et 2014 (**Figure 31**). Elle a été récemment revue à la baisse en particulier dans le rapport de la NSF (*National Science Foundation)*. Selon cette dernière, le développement des NST pourrait générer l'emploi direct de plus de 2 millions de personnes dans le monde en 2015[71]. Ces emplois seraient répartis de la façon suivante : 0,8 million aux Etats-Unis, 0,5 million au Japon, 0,4 million en Europe, 0,2 million en Asie (hors Japon) et 0,1 million sur les autres zones. A ces emplois, il conviendrait d'ajouter 5 millions d'emplois indirects[72]. Le total de 7 millions d'emplois, bien qu'inférieur de 30% à la prédiction initiale, montre une croissance impressionnante et ce,

[71] *NSF International Workshop on nanoscale science and education*, Washigton, Décembre 2011, https://www.nsf.gov/crssprgm/nano/reports/nsfnnireports.jsp

[72] *Nanomatériaux : différentes voies de synthèse, propriétés, applications et marchés*, E. Gaffet, ADSP n°64, Septembre 2008

en période d'instabilité économique et boursière. Les projections estimées pour l'Europe s'élèvent à 400000 emplois directs et à quelques centaines de milliers d'emplois indirects en 2015. Plutôt que de poursuivre ces extrapolations qui, comme dit précédemment, sont dépendantes de multiples paramètres, on peut, en considérant que la croissance du nombre d'emplois associés d'une manière directe ou indirecte aux NST est une tendance consensuelle, analyser les nouveaux métiers qui seront mobilisés par cette croissance, ainsi que les mutations professionnelles, en nombre et en qualité, qui lui seront associées.

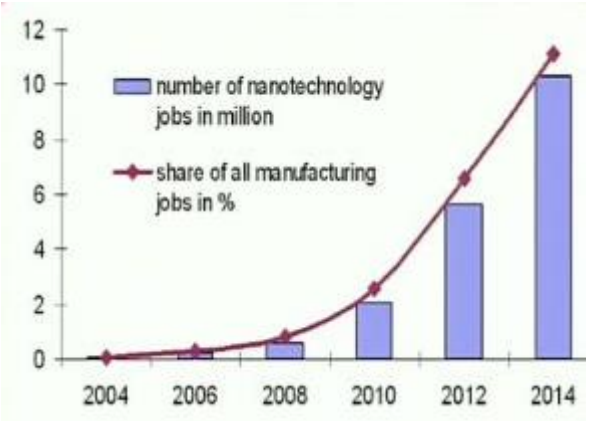


Figure 31 : Prédiction de l'évolution de l'emploi en NST entre 2004 et 2014
Source : Lux Capital, 2004

Besoins en ressources humaines dans les métiers associés aux NST

Plusieurs filières de métiers sont décisives pour le développement des NST (**Figure 32**). Les enjeux sont multiples :

- répondre à la course de l'innovation lancée par les initiatives nationales
- développer la métrologie des NST et l'instrumentation
- analyser les implications éthiques et sociales et réglementer l'utilisation des nanomatériaux
- anticiper et empêcher les risques
- communiquer en informant sur les bénéfices et les risques des NST et « éduquer » la société civile

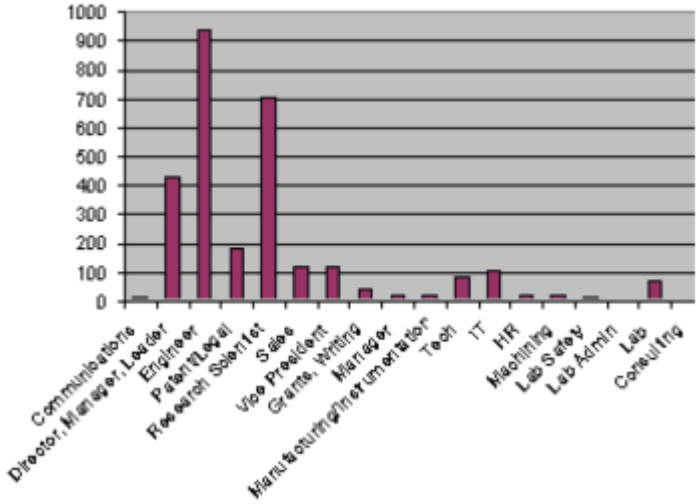


Figure 32 : Nombre d'offres d'emplois en NST (*Source : Jobs in Nanotech – Creating a Measure of Job Growth, R. Freeman & K. Shukla, SEWP Digest, Juin 2008)*

Métiers de la Recherche & Développement (R&D)

Entre les apports scientifiques visionnaires sur l'importance des nanosciences et l'avènement des nanotechnologies, il y a eu à la fois des ruptures scientifiques et technologiques et une continuité de certains métiers mis en lumière par la culture « nano » naissante. On trouve ainsi à la fois une coexistence des expressions « rupture » et « *on faisait des nanos sans le savoir* » dans les communautés scientifiques et technologiques associées aux NST. La place accrue de plateformes technologiques et d'instrumentations avancées, le mélange entre approches issues de la chimie, de la physique et de la biologie, l'animation scientifique, mais également l'attrait des programmes de financements labélisés « nano », ont contribué à construire une communauté scientifique et technologique pluridisciplinaire de R&D, se revendiquant « nano ». En France, on dénombre plus de 7000 chercheurs académiques en NST répartis dans plus de 300 laboratoires de recherche de différents organismes de recherche publics.

Les métiers de la R&D constituent le cœur des emplois, non pas en termes de nombre d'emplois mais de par leur rôle central dont dépendent les découvertes, le transfert technologique d'un laboratoire académique vers un industriel, le développement des innovations, la rentabilité d'une avancée technologique, etc. Il n'existe à ce jour pas de méthodologie permettant d'incorporer pleinement les aspects pluridisciplinaires, les éléments de langage pour faire fructifier les avancées réalisées en laboratoire dans un cadre industriel. Le manque d'ontologie, ou même de « dictionnaire » pouvant relier les jargons est notoire en NST où la pluridisciplinarité et l'étendue des domaines concernés rendent le problème encore plus central que dans d'autres domaines.

Métiers concernant l'étude et la gestion des risques liés aux NST

Des forts besoins ont été exprimés au niveau de la recherche sur les effets biologiques et écologiques des nano-objets et leurs impacts sur la santé publique. Aujourd'hui, seulement 3% des budgets publics français de la recherche sur les NST sont consacrés aux études sur les risques[73]. Il existe un vrai manque dans les métiers relatifs à la toxicologie des nanomatériaux sur la santé et à l'impact sur l'environnement. Une question qui se pose concerne la possibilité d'augmenter ces financements si un redéploiement des experts en toxicologie et éco-toxicologie ne vient pas compenser le faible nombre de spécialistes en nanotoxicologie.

Métiers répondant aux besoins en métrologie

Les besoins métrologiques s'expriment sur toute la chaîne d'innovation des NST, c'est-à-dire de la recherche fondamentale à la production industrielle des nanomatériaux. En particulier, il est apparu nécessaire qu'une chaîne de traçabilité et d'étalonnage spécifique de l'échelle du nanomètre soit mise en place au niveau national et international[74]. Le nombre d'experts français dans le domaine de la nanométrologie est très réduit et la formation nécessaire pour former de nouveaux experts prendra un temps important. Afin de répondre aux besoins métrologiques, la communauté à la fois académique et industrielle a de ce fait motivé en 2011, la création du Club nanoMétrologie, dans le but d'obtenir un effet « caisse de résonnance » de l'expertise en métrologie « nano », en agrégeant des spécialistes de l'instrumentation, de la chimie, de la biologie, la physique, etc. Ce Club réunit aujourd'hui plus de 340 adhérents dont 30% d'industriels.

[73] *Bilan du débat public sur le développement et la régulation des nanotechnologies*, CNDP, Avril 2010
[74] www.club-nanometrologie.fr

Métiers répondant aux besoins normatifs

Un grand nombre d'aspects normatifs et législatifs associés aux NST restent générique. Certains aspects liés aux items précédents (métrologie et toxicologie) sollicitent des expertises dédiées (voir la fiche variable V9 *« Encadrement des nanotechnologies»*).

Métiers liés à la communication et à l'éducation

D'autres métiers émergent parallèlement au développement des NST. En effet, la société civile montre une curiosité, parfois une méfiance, vis-à-vis des bénéfices et risques potentiels associés aux nanomatériaux sans pour autant avoir une réelle connaissance et compréhension de ce que sont les NST. La société réclame souvent tout simplement de l'information et de la formation (voir la fiche variable 8 « *Perception des NST* »), montrant la nécessité de favoriser la communication entre les différentes parties prenantes des NST. L'importance réside notamment dans le fait que les meneurs d'opinion de la société civile participent à l'écosystème des NST et influencent ainsi leurs marchés et les emplois associés (**Figures 33 et 34**).

Pour faciliter le dialogue entre acteurs des NST et société civile, une double approche doit être menée. La première allant des acteurs des NST vers la société civile à travers l'organisation d'actions de vulgarisation scientifique pour permettre à la société civile d'avoir une vision plus éclairée sur la diversité des applications des NST[75]. La deuxième consiste à écouter et comprendre les questionnements, attentes et besoins de la société civile qui doivent être reversés aux acteurs des NST. Ces interactions incluent également tous les acteurs de la chaîne de prise de décision.

Figure 33 : Types d'actitvités entreprises liées aux NST

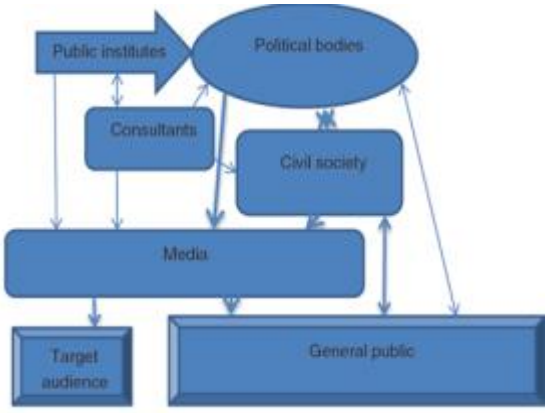


Figure 34 : Ecosystème du nano-dialogue et de la communication

Insertion des jeunes diplômés en entreprises

Compte tenu de la complexité du système académique français, l'intégration des doctorants dans les industries pâtit de quelques idées reçues historiques : expertise trop pointue, coloration trop axée sur la recherche, peu adaptable, etc. Or, dans d'autres pays européens le doctorat, ou PhD, ouvre la voie

[75] *Nano-education from a European perspective*, Malsch, Nanotechnology Rev., 2004

indistinctement vers la recherche académique ou vers l'industrie. Ce phénomène, qui se retrouve également en NST, ne sera pas discuté plus amplement dans cette fiche.

Suite à l'accroissement des formations labellisées « nano » (voir V6 « Formation en NST »), la question qui se pose est celle des difficultés ou atouts particuliers de ces formations pour l'intégration des doctorants au sein du tissu industriel. La réponse à cette question n'est pas unique. Dans le cadre des bourses CIFRE, par exemple, plus de 80% des doctorants sont recrutés dans une entreprise à l'issue de leur doctorat. Ce chiffre est du même ordre de grandeur que celui correspondant à l'insertion moyenne des boursiers CIFRE toutes disciplines confondues. Il est vrai que ce type de recrutement prend alors la forme d'un recrutement classique. D'autres industriels affirment craindre la trop grande spécialisation des docteurs en NST et ne se sentent pas rassurés par le rôle de la formation par la recherche, qui devrait pourtant être garante d'une ouverture d'esprit, d'un sens critique et d'une polyvalence. *In fine*, il semblerait que la dynamique des réseaux l'emporte très souvent soit par la culture des services RH, soit par la pénétration avec un cas réussi, soit par les alliances avec des partenaires académiques à travers l'établissement d'une relation de confiance. Mais en cela, on rejoint la problématique plus générale évoquée précédemment.

Prospective

Plusieurs déterminants vont influencer la courbe de l'emploi en NST tels que l'évolution du marché global et des sous marchés en 2030, les financements publics et privés, les politiques publiques nationales et européennes notamment en termes de réglementation, de gestion des risques et de la propriété intellectuelle. D'autres facteurs exogènes tels que la croissance économique du pays, la courbe de l'emploi en 2030 auront un impact sur l'évolution de la courbe de l'emploi en NST. La perception des NST par la société civile auront également un impact sur l'évolution de la perspective d'emplois en NST.

Tendances lourdes

Entre 2004 et 2015, la courbe de l'emploi dans la filière « nano » a été croissante notamment en raison d'un fort besoin en ressources humaines dans les métiers associés aux NST. En revanche, la problématique de l'insertion des jeunes doctorants en entreprises perdure.

Incertitudes majeures

L'incertitude sur le niveau des investissements en NST, ne permet pas de garantir la croissance de la courbe de d'emploi dans la filière. Le développement de filières spécifiques aux NST n'est pas certain car les entreprises privilégient les parcours généralistes aux parcours spécialisés.

Hypothèses prospectives

Hypothèse 1 : La courbe de l'emploi en NST en France sera croissante et suivra la tendance de la courbe de l'emploi total en 2030

Hypothèse 2 : La courbe de l'emploi en NST en France sera fortement croissante en suivant le dynamisme du marché en NST en 2030 et augmentera plus vite que la courbe d'emploi total

Hypothèse 3 : La courbe de l'emploi en NST en France sera fortement ralentie par des investissements privés faibles

VARIABLE V8 « PERCEPTIONS DES NST »

Rédacteurs : Alexei GRINBAUM (CEA), Elodie THACHIL (CNRS- C'Nano), Ariel LEVENSON (CNRS- C'Nano)

Définition de la variable et indicateurs

Ce document résume les grandes tendances de la perception des nanosciences et nanotechnologies (NST) par le grand public depuis 2001. La montée des nanotechnologies au début des années 2000 a en effet suscité de nombreuses interrogations de la société civile sur les bénéfices et risques potentiels des NST. Or, l'opinion publique joue un rôle important dans le développement des nouvelles technologies, particulièrement à l'échelle nationale. Elle peut avoir des répercussions sur la confiance des investisseurs et le déploiement industriel ainsi que sur les politiques publiques.

Les enquêtes d'opinions, les débats et réunions publiques constituent de bons indicateurs pour évaluer l'évolution de la perception des NST. Des méta-analyses ont également permis d'identifier certains facteurs sociologiques influençant la perception des NST. Les niveaux d'engagement des différents acteurs locaux ou nationaux (syndicats, ONG, associations des citoyens, groupes d'intérêts et consultants, organisations éducatives, décideurs politiques, média) reflètent à la fois leurs intérêts propres et les différences du contexte local, qu'il soit consensuel ou protestataire, entre différentes zones d'implantation de la recherche et de l'industrie en NST. Pour une synthèse nationale, il est important de tenir compte de l'existence de ces variations régionales et locales.

Cette fiche variable a pour but d'identifier les facteurs influençant la perception des NST et d'analyser le positionnement de la France.

Rétrospective

Faits marquants dans la perception des NST

L'émergence des NST a été accompagnée d'un discours d'espoir face à des défis sociétaux de taille dans les domaines de l'énergie, de la santé et de l'environnement. Ainsi, une vision du type « solution universelle », voire « révolution », est proclamée et défendue par Mihail C. Roco, le promoteur du programme américain NNI, premier vaste programme de financement des NST[76] (voir fiche variable 1 « *Pôles de R&D et de production mondiaux* »).

Le débat sur les impacts sociétaux et éthiques des nanotechnologies a donc été dans un premier temps dominé par des visions extrêmes et irréalistes[77,78,79]. Le *hype* autour des NST a été alimenté par une abondante médiatisation d'ouvrages de fiction sur l'augmentation des capacités humaines, le transhumanisme et le concept de singularité technologique[80]. Parfois commentés par la presse, ces ouvrages prédisaient, entre autres, que les NST permettraient de créer des intelligences hybrides homme-

[76] http://www.nano.gov/about-nni/what

[77] *Nanoethics: From Utopian Dreams and Apocalyptic Nightmares towards a more Balanced View*, Gordijn B., http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16279753" \o "Science and engineering ethics, 2005 Oct;11(4):521-33

[78] UNESCO Report, 2003

[79] *Le débat sur les nanosciences: Enjeux pour le CEA*, E. Klein, A. Grinbaum, V. Bontems, Rapport annuel CEA, DSM-LARSIM, Juin 2007

[80] *The Age of spiritual machines*, Ray Kurzweil, 1999

machine et d'implanter des produits issus des NST à l'intérieur du corps humain. De la même manière, certains scénarii catastrophes impliquant les NST ont été médiatisés. La gelée grise, un terme inventé par Eric Drexler en 1986[81], fut avancée comme un scénario hypothétique de fin du monde, impliquant la nanotechnologie, dans la création de robots auto-répliquant capables de consommer l'ensemble des ressources terrestres.

Ces scenarii, ainsi que les promesses exagérément associées aux NST dès le début des années 2000, ont suscité un climat d'inquiétude dans une partie de l'opinion publique, déjà mobilisée, le plus souvent dans le cadre de contestations antérieures. Pour ces groupes, suite aux traumatismes engendrés par les affaires liées aux nouvelles technologies dans le passé (catastrophes nucléaires ou chimiques comme Tchernobyl ou Bhopal, affaires du sang contaminé, de la maladie de la vache folle, etc.), les déclarations expertes sur l'équilibre entre bénéfices et risques ne peuvent plus faire foi. De fait, ces questionnements sur l'image des NST ont pu atteindre les organismes de recherche et le monde politique, qui se sont, à leur tour, mobilisés sur les questions d'expertise des risques et de communication scientifique.
Cette méfiance de la société civile n'est pas nouvelle dans l'histoire des technologies émergentes. Elle est peut-être aggravée dans le cas des NST par l'ingrédient particulier lié à l'invisibilité, à l'œil nu, des nanomatériaux et nanocomposants fabriqués. Néanmoins, hormis quelques exceptions, la plupart des parties prenantes qui se sont mobilisées sur le sujet ont avant tout réclamé davantage de transparence et d'informations. Aujourd'hui, le débat science-société semble se focaliser sur des questions plus techniques, comme la définition ou la réglementation de certains nanomatériaux[82,83,84].

Conclusions des études sociologiques

Des études sociologiques récentes[85,86,87] ont tenté de décrypter certains facteurs agissant sur la perception publique des nanotechnologies.
Le champ des NST est très vaste, ce qui suscite aussi la confusion du grand public. La perception des NST est souvent confondue avec celle des autres technologies émergentes. Qui plus est, le préfixe « nano » garde sa double aura de générateur d'innovations et d'inquiétudes. Le niveau de connaissance de la société civile sur les NST, en légère progression entre 2001 et 2009, a diminué depuis 2010. Certains travaux ont montré que plus il était élevé, plus les bénéfices potentiels des recherches sont perçus[88]. D'autres études et débats sont venus compliquer le raisonnement sur la place qu'il convient de donner à l'ignorance et à la connaissance dans la perception des risques.
D'autres facteurs plus controversés ont été mis en évidence : il s'agit notamment des facteurs culturels[84] ou religieux[86], qui ne semblent pas être spécifiques aux NST mais associés aux technologies émergentes dans leur ensemble.

Selon l'étude sociologique de Kahan *et al*[87], les sociétés dites hiérarchiques et individualistes ont tendance à ne pas répondre aux cris d'alarmes face aux risques encourus par exemple sur l'environnement, car cela aurait pour effet de menacer l'autonomie du marché ainsi que l'autorité des élites sociales. En revanche,

[81] *Engines of Creation*, Eric Drexler, 1986
[82] Evaluation des risques liés aux nanomatériaux- Enjeux et mise à jour des connaissances, Rapport ANSES, Avril 2014
[83] Recommandation de la Commission Européenne relative à la définition des nanomatériaux, Octobre 2011 (2011/696/UE)
[84] http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/31515/1/lbna26567enn.pdf, JRC scientific and policy Report, 2014
[85] *New insights into public perceptions*, Curall *et al.*, Nature Nanotechnology, Février 2009
[86] *Anticipating the perceived risk of nanotechnologies*, Satterfield *et al.*, Nature Nanotechnology Novembre 2009
[87] *Cultural cognition of the risks and benefits of nanotechnology*, Kahan *et al*., Nature Nanotechnology, Février2009
[88] *Public perception about nanotechnology: Risks, benefits and trust*, Journal of Nanoparticle Research, 2004

dans les sociétés égalitaires et communistes, les risques encourus sont pris très au sérieux et le manque de règlementation des marchés est perçue comme une source d'inégalités sociales.

Les nanotechnologies dans les médias

La place des sciences et des technologies dans les médias n'est pas la même dans les différents pays et régions du monde. De même, la médiatisation des bénéfices et risques potentiels des NST ne se fait pas de la même manière selon le pays. Ainsi, aux Etats-Unis, les journaux traitant des NST seraient plus neutres et en exposeraient moins d'avis sur les bénéfices et risques des NST par rapport aux autres pays (**Figure 35**). Le corpus associé aux NST dans les médias est très large (**Figure 36**) illustrant le vaste champ du sujet et parfois le manque de clarté des informations communiquées au grand public. Par ailleurs, il n'y a généralement pas de rubrique récurrente sur les NST dans les magazines de vulgarisation scientifique qui préfèrent se concentrer sur les applications elles-mêmes.

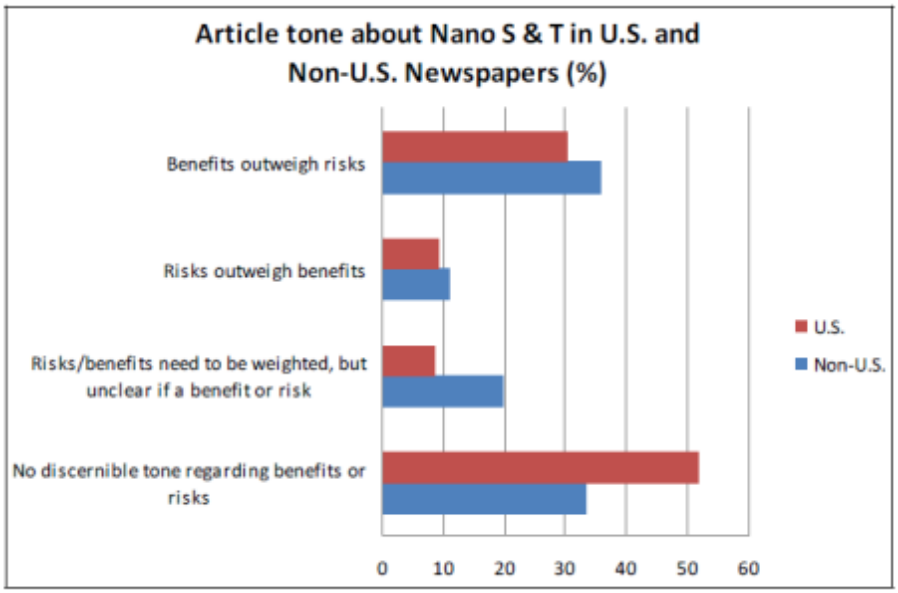


Figure 35 : Comparaison des angles de vue de la presse américaine et internationale

Perceptions des risques et des bénéfices

Les principaux risques perçus ont attrait à la santé, la sécurité, les droits de l'individu, l'utilisation à des fins militaires ou encore à l'avenir de l'espèce humaine. La crainte de ne pas pouvoir anticiper et maitriser ces risques augmente la méfiance vis-à-vis des NST. Ces préoccupations et les conclusions auxquelles elles conduisent dépendent fortement des différents acteurs, comme le montre une étude récente[89] (**Figure 37**). La même étude analyse les objets de préoccupation des acteurs en ce qui concerne les aspects économiques, sociétaux et géostratégiques des NST (**Figure 38**), tout en constatant une polarisation relative de ces préoccupations selon les acteurs concernés. Le principe de précaution est souvent évoqué dans le contexte des débats sur la gouvernance des NST. Il est sujet à différentes interprétations par les industriels, les juristes, la société civile, qui le considèrent comme un accélérateur, un frein ou un élément moratoire.

[89] *Les nanotechnologies dans l'enseignement secondaire : une recherche sur la compréhension des controverses « nanos » par des lycéens*, Thèse de B. Hingant, Mai 2013

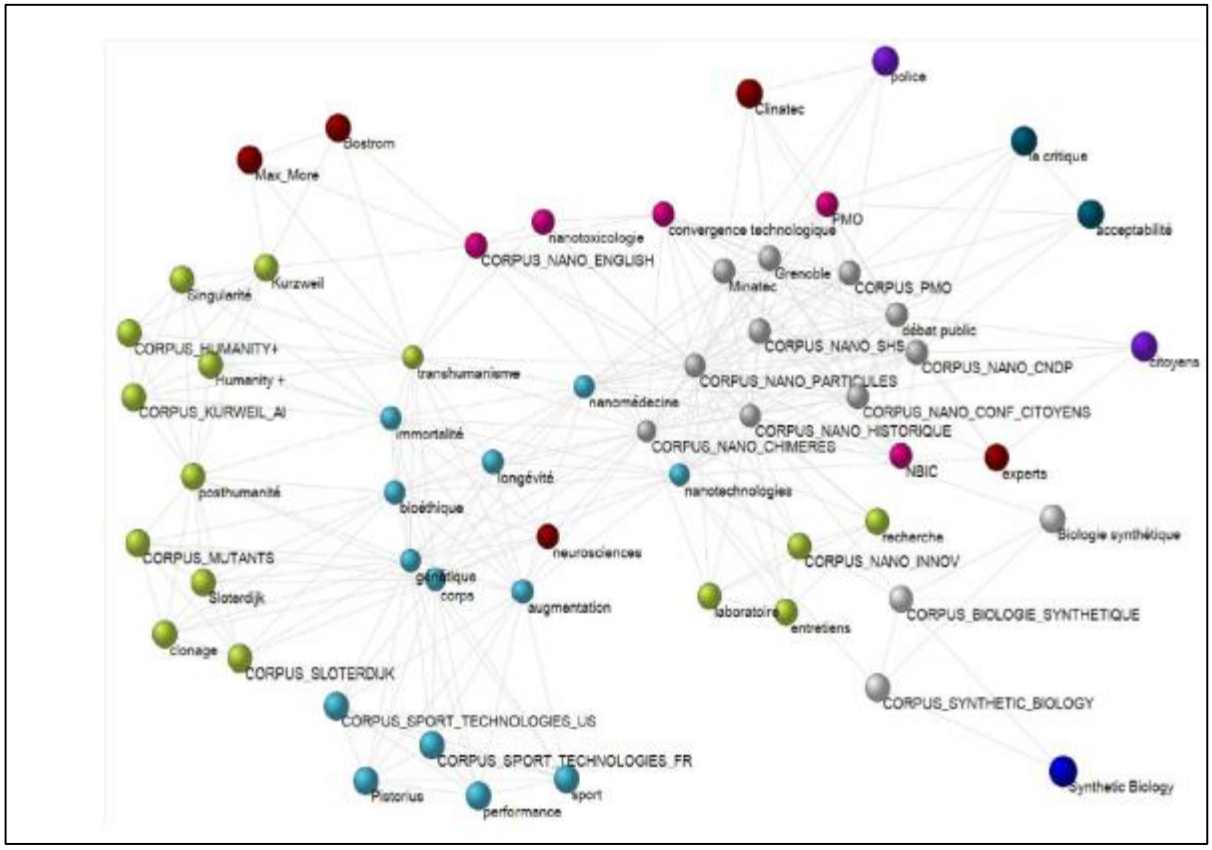


Figure 36 : relation corpus – mots clés en nanotechnologies
Source : Chateauraynaud et al., CHIMERES Promesses et Prophéties dans les controverses autour des nanosciences et des nanotechnologies, 2012

La Recherche et Innovation Responsable (RRI)

A la suite du code de conduite européen pour la recherche responsable en NST, publié en 2008, l'expression « recherche et innovation responsables » (RRI) est utilisée depuis 2011 pour désigner l'ensemble des actions et des interactions dans la sphère science-société. Cette notion, dont il existe plusieurs définitions, reflète essentiellement la prise de conscience de la communauté scientifique et des décideurs politiques, de la nécessité d'accompagner la recherche en NST par des démarches qui répondent aux inquiétudes de la société et aux questions éthiques posées par ces nouvelles technologies. La RRI est particulièrement impulsée en Europe par le programme HORIZON 2020. On développe dans ce contexte des indicateurs précis et des feuilles de route pour la RRI dans le domaine des NST et d'autres technologies émergentes, impliquant les thèmes comme la perception publique des technologies, l'éducation et la réglementation.

Position de la France

Selon certaines études, la France se situe parmi les pays où l'on exprime un scepticisme à l'égard des NST. D'autres études montrent que cette opinion n'est portée que par des courants minoritaires, même s'ils sont très audibles et que l'excitation par l'effet de nouveauté domine.

Le débat public organisé par la Commission nationale de débat public (CNDP) en 2009 et 2010 n'a pas eu tout le succès escompté. Les conditions de préparation et le déroulement temporel n'étaient pas propices à un vrai échange entre experts, associatifs et grand public. Quelques conclusions ont permis toutefois d'établir en particulier le manque de communication scientifique et de diffusion des informations ainsi qu'un sentiment d'éloignement de la communauté scientifique vis-à-vis des questions sociétales. D'autres réflexions semblent reconnaître que, au-delà de l'échec des aspects les plus visibles de ce débat (séances annulées, public peu nombreux, présence ponctuelle de groupes rendant impossible toute discussion), la procédure a néanmoins permis la publication d'une cinquantaine de cahiers d'acteurs instructifs sur le positionnement de très nombreuses parties prenantes dans les controverses en cause, et de se faire une idée beaucoup moins caricaturale du paysage public en la matière. Elle a aussi donné lieu à une conclusion du gouvernement.

Selon un sondage IPSOS réalisé en 2011, seulement 44% des Français font confiance aux scientifiques pour les informer, mais 69% d'entre eux se disent l'être mal sur le sujet. Pour autant, la même étude révèle qu'une très large majorité des sondés (88%) souhaite que l'on développe la recherche en NST, un pourcentage identique à celui obtenu pour le réchauffement climatique et très supérieur à celui pour les OGM ou le nucléaire (**Figure 39**). De son côté, le rapport interministériel de 2013 concluait que l'absence d'information au public était critique[35.]

Prospective

Tendances lourdes

Rôle accru des acteurs institutionnels sur les perceptions des NST

Les acteurs institutionnels ont une influence sur les différentes perceptions des « nano » car ils sont à l'origine des programmes de communication et d'éducation. Ces actions peuvent être impulsées en amont par les décideurs politiques. Ainsi, le rapport interministériel publié en 2013 propose de créer des conditions de confiance pour les NST sur les aspects sociétaux, en définissant trois objectifs[35] :

- Développer l'appropriation de NST par le grand public à travers des évènements phares comme la « *Fête de la Science* » et la « *Semaine de l'industrie* » ;
- Encourager les établissements d'enseignements de recherche et les organismes de recherche à mieux valoriser les actions conduites par les chercheurs en matière d'animation du débat science et société ;
- Encourager les collectivités territoriales à déployer des actions de sensibilisation.

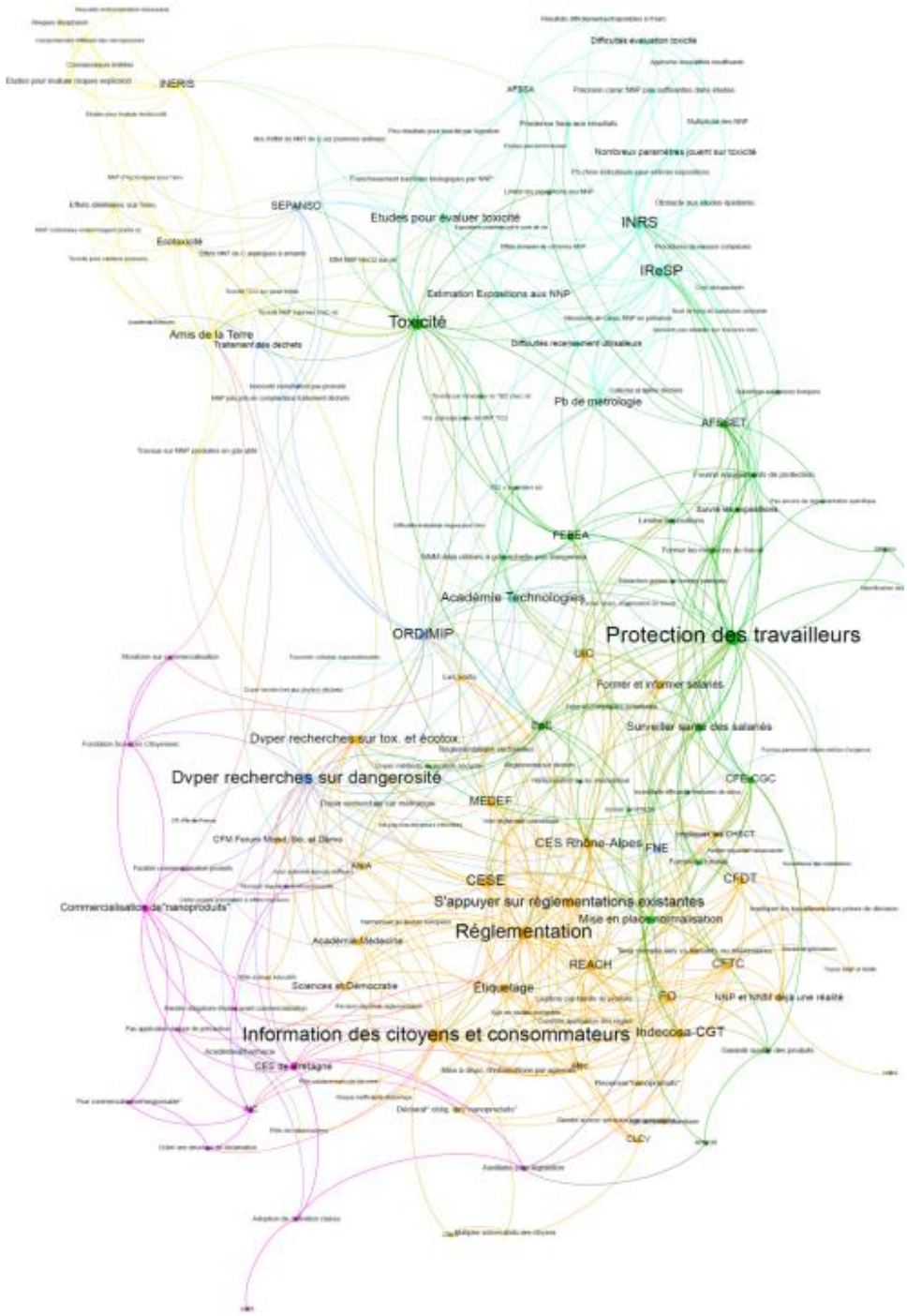


Figure 37 : Perception de différents acteurs des problématiques liées à la santé et à l'environnement
Source : Thèse de B. Hingant[89], 2013

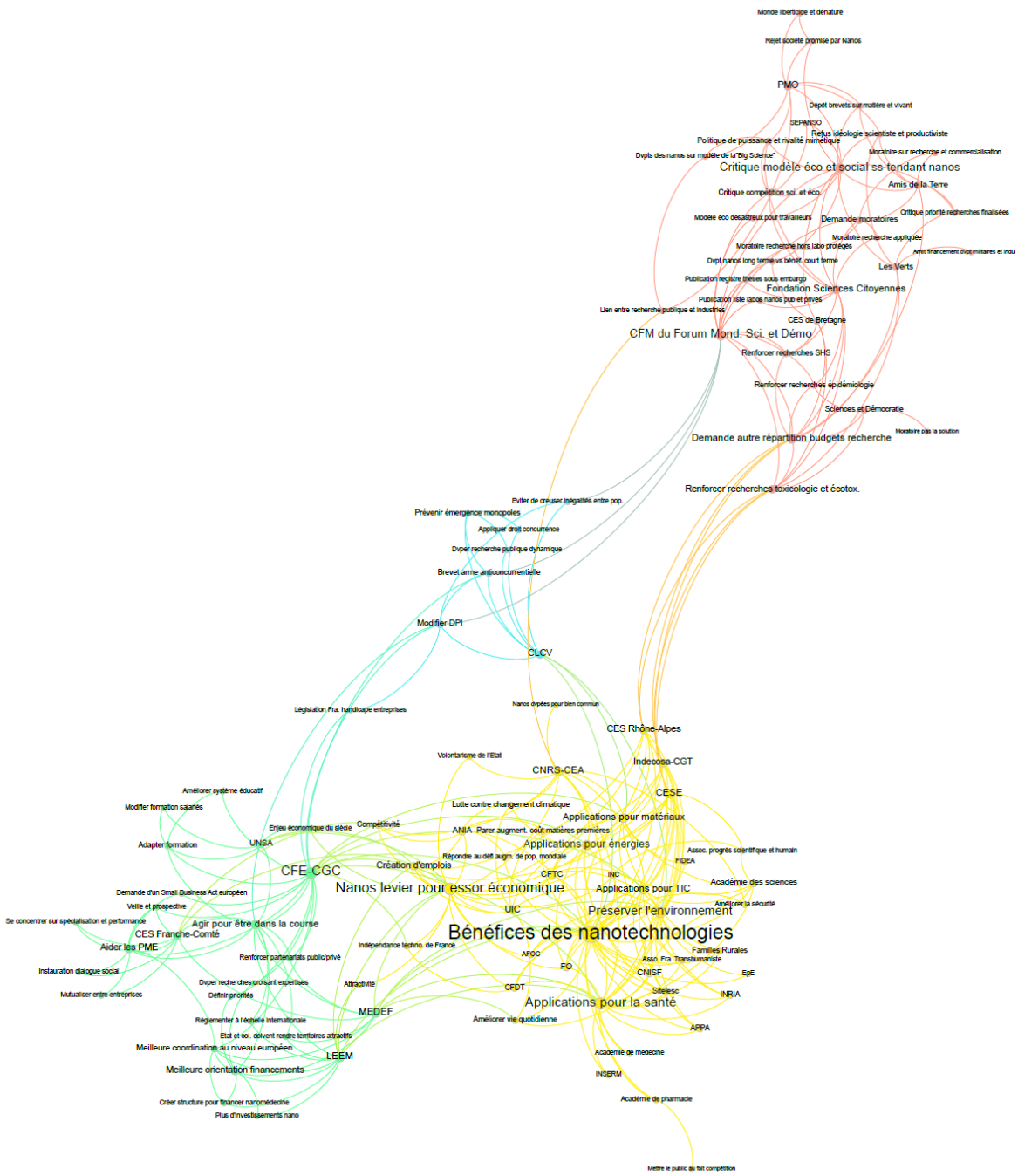


Figure 38 : Perception de différents acteurs liés aux aspects économiques, marché et géostratégiques
Source : Thèse de B. Hingant[89], 2013

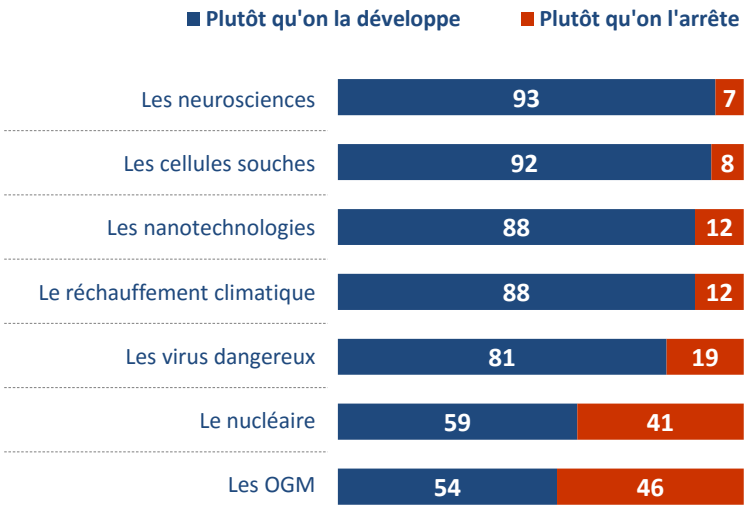


Figure 39 : Sondage Ipsos de la société civile sur les nouvelles technologies

D'autres actions à destination de la société civile ont pour but d'informer le grand public sur les nanotechnologies. L'exposition itinérante intitulée « *Nanotechnologies et société* », en coproduction avec le centre de culture scientifique de Grenoble et celui de Bordeaux, a mobilisé le grand public sur les enjeux scientifiques, économiques, et sociétaux et avait permis de donner la parole aux parties prenantes.

Présence, engagement et pluralité accrue des associatifs

Les associations et la société civile sont de plus en plus engagées dans les prises de position sur les NST. Certaines d'entre elles poursuivent des actions de déstabilisation de la recherche et du débat sur le sujet[13]. Au nom du principe de précaution, des associations ont demandé un moratoire contre les recherches en NST, telles que « *Les amis de la Terre* » et « *Pièces et Main d'œuvre* ». Elles sont cependant peu nombreuses, mais leurs actions restent bien relayées par la presse.

D'autres acteurs associatifs sont plus consensuels : « *Vivagora* », l'association « *France Nature* » et « *Environnement* » font partis des acteurs qui ont une position ouverte au débat et attentifs à la transparence. Le rapport interministériel souligne l'hétérogénéité de ces acteurs associatifs consensuels et leurs faibles structurations[35].

Demande d'informations par la société civile

Dans le domaine des NST, l'absence d'information vers le grand public est critique[35]. Le débat de 2009 sur les NST a permis de souligner la demande d'informations par la société civile qui perçoit les NST comme un domaine opaque.

Déplacement des controverses sur des secteurs d'application

Auparavant, les controverses étaient centrées sur les NST en général puis se sont progressivement déplacées par secteur d'applications. L'incorporation de nanomatériaux dans les cosmétiques suscite de fortes divergences d'opinions bien relayées par les médias. De la même manière, les NST permettraient d'étendre les possibilités en biométrie. De telles applications ne font pas l'unanimité. Les critiques portent sur les conséquences pour les libertés individuelles (traçage des individus) et sur les modalités de mise en œuvre.

Couplage technologies -enjeux sociétaux

La pénétration des NST dans les marchés à fort impact sociétal, tels que le médical, est en plein développement et contribue à matérialiser les bénéfices associés aux NST.

Incertitudes majeures

Investissement des acteurs dans la diffusion des savoirs

Une incertitude réside dans la capacité à coordonner au niveau national la diffusion des connaissances auprès du grand public dans les différents domaines couverts par les NST.

Une meilleure compréhension des NST n'est pas nécessairement associée à une plus grande adhésion de la société civile

La théorie du « *deficit model of science* » considère qu'un public n'ayant pas de connaissance scientifique sera méfiant envers les avancées de la science et de la technologie. Ce concept est discuté parmi la communauté de sociologues à la suite de la publication d'études qui montrent que le niveau de connaissance scientifique n'est pas associé à une meilleure perception des technologies.

Certains évènements majeurs concernant les NST peuvent avoir des impacts sociétaux

La survenue d'effets sanitaires graves, la découverte d'innovations majeures concernant les enjeux sociétaux, le débordement de débats ou d'autres évènements peuvent faire basculer l'opinion publique dans une direction donnée.

Hypothèses prospectives

Hypothèse 1 : La société a une connaissance diffuse des NST et ces derniers ne sont pas un sujet de controverse

Hypothèse 2 : La société a une large connaissance des NST et ces derniers ne sont pas un sujet de controverse

Hypothèse 3 : La société a une large connaissance des NST et ces derniers sont un sujet de controverse

Hypothèse 4 : La société a une connaissance diffuse des NST et ces derniers sont un sujet de controverse

Hypothèse 5 : La société a un engouement sur les bénéfices des NST tout en restant vigilante sur les risques potentiels

VARIABLE V9 « ENCADREMENT DES NANOTECHNOLOGIES : NORMES, ETHIQUE, REGLEMENTS »

Rédactrice : Stéphanie LACOUR (CNRS-C'Nano)

Définition de la variable et indicateurs

Cette fiche variable traite largement de l'encadrement des nanosciences et nanotechnologies (NST). Elle inclut les développements relatifs aux normes juridiques, bien sûr, mais également aux normes éthiques et techniques, qui ont été adoptées dans ce domaine.

L'encadrement du développement des NST est affirmé par les pouvoirs publics et les organisations interétatiques ou privées comme une nécessité permettant la réalisation des promesses qui sont associées à l'effort consenti. Il inclut les aspects visant à organiser le déploiement des recherches et la mise en œuvre des moyens pour favoriser le transfert des résultats de ces recherches vers le secteur industriel afin de soutenir le tissu économique et l'emploi. Il inclut également, au regard du principe de précaution, la prise en considération des risques sanitaires et environnementaux que ces nouvelles technologies pourraient engendrer ainsi que les questions sociales et éthiques qui leur sont attachées. Ces objectifs sont au cœur des préoccupations des pouvoirs publics et des acteurs des organisations (interétatiques ou privées) qui développent des normes.

Ainsi, cette variable est à la fois indépendante et peut, dans certains cas, être fortement liée à plusieurs autres, en particulier les variables V1 « *Pôles de R&D et de production mondiaux* », V3 « *Pilotage de la recherche et de l'innovation* », V4 « *Relations académie-industrie* », V8 « *Perception des NST* » et V10 « *Risques et gestion des risques* ».

Quatre indicateurs sont pertinents pour aborder la question du développement responsable des nanotechnologies :

- La persistance de normes antérieures, éthiques et/ou juridiques, dans le domaine des bio-nanotechnologies ;
- L'objet des normes adoptées ou en cours de discussion ;
- Les modalités de régulation : cet indicateurs est pertinent pour comprendre la construction de l'encadrement des nanotechnologies concerne le choix des modalités concrètes de règlementation ;
- Le développement d'obligations d'information : cet indicateur concerne le contenu des règles adoptées dans les différents secteurs concernés par le développement des NST.

Rétrospective

Le développement de l'instrumentation de précision (microscopes à effet tunnel et à force atomique, notamment), dans le courant des années 1980, n'a pas suscité de réaction normative immédiate.
Dès la fin des années 1990, en revanche, les politiques publiques ont pris la mesure des bouleversements que pouvait entraîner la connaissance et l'exploitation des propriétés de la matière à l'échelle nanométrique et ont commencé à se déployer pour venir tout à la fois promouvoir leur développement (voir variable n°1) et encadrer les risques éventuels que celui-ci pourrait causer. Ce double objectif s'est matérialisé autour de la notion de « développement responsable » des nanotechnologies, qui

a été utilisée dans les textes consacrés aux nanotechnologies aux Etats-Unis, en Europe, et par les organisations internationales (OCDE, ISO, etc.).

Les normes éthiques et/ou juridiques, techniques et réglementaires

Le lien entre normes éthiques et normes juridiques est concrètement illustré par l'adoption, en 2008, d'un code de bonne conduite pour une recherche responsable en nanosciences et nanotechnologies[90], au niveau européen, qui aurait dû faire l'objet de révisions ultérieures, mais a finalement été laissé en l'état.
Malgré des discussions très larges et l'organisation de débats publics sur de nombreuses questions liées au développement des nanosciences et nanotechnologies (variable 8 « *Perception des NST* »), la plupart des normes techniques et réglementaires qui ont été publiées jusqu'à aujourd'hui sont consacrées exclusivement aux nanomatériaux. Cet état de fait trouve une partie de son explication dans la dissociation effectuée, dans les principales politiques publiques en la matière entre les nanosciences et nanotechnologies, qu'il s'agit de développer[91], et les nanomatériaux, dont il s'agit de prévenir les risques éventuels[92]. C'est sur ces derniers que se sont, par ailleurs, mobilisés les efforts de définition à la fois dans les normes techniques[93] et dans les textes réglementaires[83]. La définition du périmètre couvert par le « champ nano » a en effet constitué une difficulté majeure, ayant suscité de nombreux travaux d'experts et des controverses internationales dans lesquelles se sont mêlés des questions scientifiques, techniques, épistémologiques et sectorielles.

Les modalités de régulation

Il faut, en la matière noter d'une part que la forme des normes dédiées aux nanomatériaux s'est progressivement durcie depuis le milieu des années 2000, passant de normes non contraignantes (communications de la Commission Européenne, notamment) à l'adoption de normes juridiques au sens strict du terme, particulièrement depuis 2009. Ce durcissement ne signifie pas pour autant que l'édiction de normes relevant du champ de la « *soft law* »[94] ait été progressivement abandonnée. Bien au contraire, on voit aujourd'hui se multiplier les initiatives relevant de la normalisation technique (ISO TC 229, CEN TC 352, AFNOR X457) ou encore de chartes et guides de bonnes pratiques plus ou moins institutionnalisés. Mais des normes plus directement contraignantes ont, depuis 2009 été adoptées en particulier au niveau européen et français.
D'autre part, cette même problématique « nano » s'est développée très largement dans le domaine public et dans les rapports des comités d'éthique, le choix a été fait, en matière juridique, de juxtaposer des ajouts dans des règlementations sectorielles plutôt que d'adopter une règlementation spécifique aux nanotechnologies. Les deux revues réglementaires publiées par la Commission européenne, respectivement en 2008 et 2012, sont à cet égard sans équivoque[95,96]. C'est ainsi que, depuis 2009, les

[90] *Recommandation de la commission concernant un code de bonne conduite pour une recherche responsable en nanosciences et nanotechnologies*, 424 final - Bruxelles, Février 2008
[91] *To develop science-based standards for the field of nanotechnology in order to promote its commercial applications in a secure manner,* ISO le TC 229, Juin 2009
[92] *Nanosciences et nanotechnologies : un plan d'action pour l'Europe 2005-2009. Premier rapport de mise en œuvre 2005-2007*, Communication de la Commission au Conseil au Parlement Européen et au Comité Economique et Social, Bruxelles, Septembre 2007
[93] Travaux de l'ISO TC 229 et du groupe de travail de l'OCDE sur les nanomatériaux manufacturés (WPMN)
[94] Ensemble de textes dont la portée normative est incertaine : déclarations de principes, résolutions d'organisations internationales mais aussi codes de conduite, chartes de bonnes pratiques, *etc*. Par extension, la notion couvre tous les textes dont la juridicité n'est pas établie par référence à une contrainte ou une sanction obligatoire, dont les normes volontaires émanant d'organisation nationales et internationales.
[95] *Aspects réglementaires des nanomatériaux,* Communication de la Commission au Conseil au Parlement Européen et au Comité Economique et Social Européen, Bruxelles, Juin 2008

textes relatifs aux cosmétiques[97], les emballages alimentaires[98], l'information des consommateurs de produits alimentaires[99], les équipements électroniques[100] ou encore les produits biocides[101], entre autres ont vu le jour indépendamment.

Le développement d'obligations d'information

Le contenu des règles adoptées dans les différents secteurs concernés par le développement des NST peut être décrit en deux parties :

- d'une part, les autorités publiques se dotent de plus en plus de règles propres à leur permettre un recensement des nanomatériaux présents sur leur territoire, à l'image de l'obligation de déclaration mise en place par les Lois Grenelle[102], en France et, dans une moindre mesure, des dispositions du règlement REACH au niveau européen[103]. Plusieurs Etats européens[104] sont en train de se doter d'obligations de déclaration, plus ou moins inspirées du modèle français en matière de nanomatériaux et la Commission européenne étudie, de son côté, la possibilité de mettre en œuvre un régime similaire au niveau européen[105] ;
- d'autre part, faisant suite à la mobilisation d'un grand nombre de parties prenantes, les législations adoptées au niveau sectoriel privilégient également une approche en termes d'information, dirigée vers le public (les consommateurs) cette fois, comme c'est le cas en ce qui concerne les cosmétiques, les denrées alimentaires ou les biocides[106].

Prospective

L'encadrement des NST a fortement évolué depuis l'apparition des premières communications publiques institutionnelles qui les concernaient, au début des années 2000. L'orientation générale de cette évolution est celle d'un durcissement de l'encadrement, pris en charge aujourd'hui autant par voie réglementaire que dans des textes de « *soft law* » et d'une attention particulière portée à l'information, tout à la fois des pouvoirs publics et des publics tout court.

Plusieurs déterminants pourraient avoir un impact sur l'évolution de l'encadrement des nanotechnologies :

---

[96] *Deuxième examen réglementaire relatif aux nanomatériaux,* Communication de la Commission au Parlement Européen au Conseil et au Comité Economique et Social, Bruxelles, Octobre 2012

[97] Règlement (CE) n°1223/2009 du Parlement européen et du Conseil du 30 novembre 2009 relatif aux produits cosmétiques

[98] Règlement (CE) 450/2009 de la Commission du 29 mai 2009 concernant les matériaux et objets actifs et intelligents destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires et Règlement (CE) 450/2009 de la Commission du 29 mai 2009 concernant les matériaux et objets actifs et intelligents destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires

[99] Règlement (UE) 1169/2011 du Parlement européen et du Conseil du 25 octobre 2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires

[100] Directive (UE) 2011/65 du Parlement européen et du Conseil du 8 juin 2011 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques

[101] Règlement (UE) n ° 528/2012 du Parlement européen et du Conseil du 22 mai 2012 concernant la mise à disposition sur le marché et l'utilisation des produits biocides

[102] Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement et Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement

[103] Règlement (CE) n°1907/2006, concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH)

[104] Notamment la Belgique (arrêté royal relatif à la mise sur le marché des substances manufacturées à l'état nanoparticulaire en Belgique du 7 février 2014), le Danemark,

[105] http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/reach/nanomaterials/public-consultation_en.htm

[106] En ce sens, V. Règlement (CE) n°1223/2009 relatif aux produits cosmétiques, Règlement (UE), n°1169/2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires, Règlement (UE) n ° 528/2012 concernant la mise à disposition sur le marché et l'utilisation des produits biocides.

- la survenance d'un ou plusieurs dommages liés à l'utilisation des nanomatériaux, que ce soit en situation de travail ou vis-à-vis de l'environnement ou des consommateurs ;
- La remise en cause ou, à l'inverse, le renforcement du principe de précaution, dans sa dimension constitutionnelle ;

- le décollage effectif d'un ou plusieurs marchés des nanotechnologies, sur la base des modèles publiés au début des années 2000 par les officines de prospective économique (Rapports de *Lux Research*, notamment) ;
- une mobilisation publique ou sectorielle plus importante dans un sens ou l'autre.

Tendances lourdes

Les tendances lourdes suivantes peuvent être dégagées :

- le développement responsable des nanotechnologies
- les difficultés de définition des objets réglementés
- la forme de régulation plus dure mais principalement sectorielle
- le développement d'obligations d'information

Incertitudes majeures

Les incertitudes majeures concernent les points suivants :

- les dommages sanitaires et/ou environnementaux
- la viabilité des marchés émergents
- la mobilisation publique
- le contexte politique
- l'évolution du principe de précaution

Hypothèses prospectives

Quatre hypothèses peuvent être dégagées à partir des tendances lourdes et incertitudes majeures précédemment listées.

Hypothèse 1 : Poursuite de l'encadrement sur des modalités similaires

Dans cette hypothèse, on assiste à une multiplication de normes sectorielles modérément contraignantes (veille, notamment) avec une extension éventuelle au niveau européen et/ou international des obligations de déclaration et d'étiquetage déjà déployées en France.

Hypothèse 2 : Durcissement relatif de la réglementation relative aux nanomatériaux

Ce durcissement s'accompagne de la mise en place d'obligations de déclaration assorties d'un régime d'enregistrement, sur le modèle de REACH pour les substances chimiques, suspendant l'accès au marché pour les nanomatériaux qui ne remplissent pas les conditions énoncées en termes d'information (*no data, no market*) sur les risques, voir la mise en place d'autorisations de mise sur le marché des nanomatériaux, sur le modèle de la règlementation du médicament en Europe.

Hypothèse 3 : Durcissement et/ou extension de la réglementation par secteur ou type de nanomatériaux selon les risques avérés

Dans cette hypothèse, on assiste à la mise en place d'interdictions de mises sur le marché, par secteurs (Produits agro-alimentaires, produits cosmétiques, électronique, etc.) ou seulement par matériau (NTC, NanoAg, nanoTiO_2, etc.)

Hypothèse 4 : **Déréglementation des nanotechnologies dans leur ensemble**

Cette déréglementation serait éventuellement liée à une pression internationale et au rejet du principe de précaution.

VARIABLE V10 : « RISQUES ET GESTION DES RISQUES SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX »

Rédacteur : Eric GAFFET (CNRS- IJL)

Définition de la variable et indicateurs

Cette fiche variable traite des risques, immédiats ou à long terme, pour la santé humaine et pour l'environnement associés au développement des nanomatériaux manufacturés.

Les nanosciences et nanotechnologies (NST) constituent autant un nouveau paradigme quant à notre mode de représentation de la matière qu'un ensemble de nouveaux objets d'étude en ce qui concerne les nanomatériaux et leurs propriétés physicochimiques spécifiques. Leur développement est promu par de récentes percées, notamment en matière d'instrumentation tant du point de vue de l'observation 3D spatio-temporelle que du point de vue de la manipulation des nano-objets.

Fort de ces avancées instrumentales, se développe un renouveau de questions fondamentales sur la structure de la matière et ses propriétés à l'échelle atomique, expliquant l'engouement marqué de la communauté scientifique. Au-delà de ces développements scientifiques, la volonté d'assurer le développement responsable, maîtrisé et sécurisé de ces nanomatériaux (ou encore développement durable) et des nanotechnologies, conduit à s'interroger sur la maîtrise des risques que pourraient introduire dans l'environnement ou encore dans les usages quotidiens des nanoproduits à base de ces nanomatériaux.

En corollaire de cette démarche, il devenait désormais important pour les autorités publiques de définir le champ « nano » à l'aide d'éléments de définition sur lesquels d'éventuels textes réglementaires pourraient être susceptibles de s'appuyer.

La mise en place depuis le 1er janvier 2013 de l'obligation de déclaration des substances à l'état nanoparticulaire révèle, dans son bilan annuel, d'importants tonnages concernant les substances à l'état nanoparticulaire produites, importées et distribuées en France en 2012 :

- la quantité agrégée de ces substances produites en France est de 282 014 tonnes ;
- la quantité agrégée de substances importées en France est de 222 090 tonnes ;
- le nombre total de catégories de substances à l'état nanoparticulaire déclarées est compris entre 243 et 422.

Rétrospective

Dès le début des années 2000, l'état des connaissances sur les effets des particules micro/nanométriques de la pollution atmosphérique faisait craindre des effets sur la santé des nanoparticules fabriquées par l'homme[107]. Cependant, très peu de données fiables sont disponibles actuellement dans ce domaine. Mais les études publiées font état d'interactions des nanoparticules au niveau cellulaire qui incitent à la prudence. Récemment, des travaux tendent à démontrer que certains nanotubes de carbone pourraient induire des effets similaires à des fibres d'amiante (induction du mésothéliome)[108].

[107] *Ten toxic warning,* ETC Group

[108] *Asbestos, carbon nanotubes and the pleural mesothelium: a review of the hypothesis regarding the role of long fibre retention in the parietal pleura, inflammation and mesothelioma*". Donaldson, K., Murphy F. A., Duffin R., Poland C. A., Particle and Fibre Toxicology 7, 2010

Comme indiqué dès 2005 dans une note de synthèse[109], les questions scientifiques importantes dans le domaine « nanoparticules et santé » doivent concerner tout le cycle de vie et s'intéresser plus particulièrement aux aspects suivants :

- la caractérisation physico-chimique et la classification des nanoparticules selon leur degré de réactivité de surface, signe d'effets biologiques potentiels ;
- la détection et la caractérisation de l'exposition à ces particules des opérateurs de fabrication aux utilisateurs ;
- leurs effets biologiques potentiels sur l'homme.

Ces questions concernent aussi bien les travailleurs du secteur des nanotechnologies et nanomatériaux, qui peuvent être exposés à des concentrations importantes de nanoparticules, que la population en général, dont l'exposition à ces nanoparticules, plus indirecte, est liée au cycle de vie de ces nano-objets.

Enfin, le risque associé à l'explosion de nanoparticules constitue également une question importante et relativement peu étudiée concernant le personnel impliqué dans la fabrication de nanomatériaux à partir de ces nanoparticules.

Il convient de souligner que les champs « toxicité et écotoxicité » sont à la croisée des chemins entre deux directions reposant sur des principes très distincts :

- **Principe actuel** : Les études sont menées au cas par cas
- **Principe rénové :** Les études portent sur le « *Safer by design/process* ».

L'étude des effets toxiques induits spécifiquement par la dimension nanométrique des nanoparticules a désormais fait l'objet de nombreux travaux[108,110,,111,112,113,114,115]. Cependant, il convient d'indiquer que ces résultats sont encore très parcellaires. Ils ne concernent ni les produits réellement susceptibles d'exposer potentiellement les consommateurs[116] ni ne considèrent la totalité des voies potentielles d'exposition - l'ingestion est par exemple très peu considérée. Enfin, il convient de souligner que près de 80% des publications parues avant 2007 ne décrivaient que très partiellement les nanoparticules ayant fait l'objet de la recherche[117]. De telles incertitudes ne permettent donc pas d'établir une quelconque corrélation entre les paramètres physico – chimiques et les résultats de toxicité et d'écotoxicité.

---

[109] *Les déterminants environnementaux : Nanoparticules et santé* , Note de synthèse pour le PNSE Coordination: J. Boczkowski, E. Gaffet et A. Lombard

[110] *Relation between the redox state of iron-based nanoparticles and their cytotoxicity toward Escherichia coli,* Auffan, M. *et al*, Environmental Science & Technology 42(17), pp 6730-6735, 2008

[111] *Toxicological effects of multi-wall carbon nanotubes in rats,* Liu, A. H. *et al.*, Journal of Nanoparticle Research 10(8), pp 1303-1307, 2008

[112] *Clastogenic and aneugenic effects of multi-wall carbon nanotubes in epithelial cells,* Muller, J. *et al.*, Carcinogenesis 29(2), pp 427-433, 2008

[113] *Respiratory toxicity of multi-wall carbon nanotubes,* Muller, J. *et al.*, " - Toxicology and Applied Pharmacology 207(3), pp 221-231, 2005

[114] Takagi, A., A. Hirose, T. Nishimura, N. Fukumori, A. Ogata, N. Ohashi, S. Kitajima, J. Kanno, (2008), "*Induction of mesothelioma in p53+/- mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube*". Journal of Toxicological Sciences 33(1), pp 105 - 116

[115] *Comparative pulmonary toxicity assessment of single-wall carbon nanotubes in rats*, Warheit, DB *et al.*, Toxicological Sciences 77(1), pp 117-125, 2004

[116] *Nanotoxicology: characterizing the scientific literature, 2000-2007*, Ostrowski A.D. *et al.,* J Nanopart Res 11, pp 251–257, 2009

[117] *Categorization framework to aid hazard identification of nanomaterials,* Hansen S.F. *et al.*, Nanotoxicology, 18, 2007

D'autre part, comme le souligne la première estimation du coût et de la durée des travaux requis pour réaliser des études de nanotoxicologie sur les nanomatériaux déjà existants[118], cela couterait à l'industrie américaine entre 249 M$ et 1,18 Md$ pour une durée de plus de 50 ans.
Le secteur économique s'est également saisi de la question des nanotechnologies et il est intéressant de noter l'évolution sémantique concernant l'impact du développement des nanotechnologies sur les projections économiques menées dans le cadre du Forum Economique mondial de Davos. En effet, si en 2008, les nanotechnologies étaient classifiées dans le domaine des risques économiques[119] (parmi les 26 *core global risks*), en 2011, elles étaient classées parmi les menaces économiques[120] (« *Threats from new technologies* »), au même titre que l'ingénierie génétique, la biologie de synthèse. Nul doute que la progression des connaissances sur les effets sanitaires et environnementaux et la médiatisation de certains articles tendant à assimiler le comportement de certains nanotubes à l'amiante ont contribué à cette évolution notable[121,122,123].

De tels constats invitent radicalement désormais à réfléchir à la nécessaire urgence d'un développement industriel responsable et durable, encore appelé « *safer by design* » ou « s*afer by process* ». Partant des propriétés spécifiques des nanomatériaux et de l'évolution des nanomatériaux tout au long de leur cycle de vie, Morose et al. (Morose et al. 2010[124]) ont développé un moyen mnémotechnique pour mémoriser ce qui est entendu par cette nouvelle conception des nanomatériaux, à savoir : SAFER : S pour « *Size, surface and structure* », A pour « *Alternative materials* », F pour « *Functionalization* », E pour « *Encapsulation* » et R pour « *Reduce the quantity* ».

C'est un véritable changement de paradigme puisque d'une approche actuelle contrôlant a posteriori l'innocuité des nanoparticules et/ou des nanoproduits, il est proposé de concevoir, dès les premières étapes de l'élaboration et de la mise en œuvre, des nanoparticules et/ou des nanoproduits présentant le moins de risques possibles pour la santé de l'homme et l'environnement. Il s'agit donc d'intégrer la maîtrise des risques des nanomatériaux comme un élément au même titre que les autres paramètres de même titre que les autres paramètres de champs tels que l'élaboration, la mise en œuvre, ou encore la conception / le design.

Pour conduire un tel changement[125], il est ainsi proposer d'évoluer d'une phase à courts termes portant sur la collection de données, de mise en œuvre de bonnes pratiques en Hygiène et Sécurité industrielle, la publication de guides bonnes pratiques, l'évaluation de la toxicité vers une phase à plus longs termes s'appuyant sur l'évidence de la toxicité, la réduction de la toxicité, les mesures de contrôles d'atmosphères effectives, une amélioration continue des meilleurs pratiques H et S, et la limitation de l'usage des certaines nanoparticules si le risque est trop élevé.

---

[118] *The impact of toxicity testing costs on nanomaterial regulation,* Choi J.Y. *et al.*, Environ. Sci. Technol., 43 (9), pp 3030–3034, 2009
[119] *A World Economic Forum Report* – Davos - 2008
[120] *Global Risks 2011* - Sixth Edition- An initiative of the Risk Response Network World Economic Forum in collaboration with : Marsh & McLennan Companies, Swiss Reinsurance Company, Wharton Center for Risk Management,, University of Pennsylvania, Zurich Financial Services , January 2011
[121] Mitsui temporarily stops MWNT shipments over perceptual EHS worries, http://64.233.183.104/search?q=cache:1HepRVRPt2oJ:pv2.luxresearchinc.com/+mitsui+nanotube+lux+research&hl=fr&ct=clnk&cd=3&gl=fr, Juin 2008
[122] Cancer linked to fibres in tennis racquets / Daily Telegraph, Mai 2008 http://www.telegraph.co.uk/news/uknews/1996820/Cancer-linked-to-fibres-in-tennis-racquets.html
[123] *Nano Impact Net,* Kenneth Dawson, 23 Mars 2009
[124] *The 5 principles of "Design for Safer Nanotechnology,* Morose, G., Journal of Cleaner Production, 18(3), pp 285-289, 2010
[125] *Nanotechnology long – term impacts and research Directions 2000 – 2020,* WTEC, 2010, http://www.wtec.org/nano2/docs/ChaptersPdf/Ch04_NanoEHS_draft_2010-0929.pdf

Une telle approche a d'ores et déjà été proposée et intégrée par la Commission Européenne en Octobre 2011[126] qui suggère par exemple, dans le cadre de l'évaluation de la sécurité des nanomatériaux dans les cosmétiques d'étudier la possibilité de développer des critères d'évaluation ne reposant plus sur une approche au cas par cas, mais sur une approche dite catégorielle (« *category-based approach rather than a case by case basis* »).

Prospective

Déterminants de l'évolution future de la variable

En dépit des avancées indiquées dans le rapport de l'ANSES datant de 2014[21], les connaissances concernant la toxicité et l'exposition restent parcellaires et il est encore très difficile de se prononcer sur le risque sanitaire lié à l'utilisation de tel ou tel nanomatériau dans tel ou tel produit de la vie courante.

Une évaluation de risque systématique au « cas par cas » n'est pas envisageable pour la prise en charge à court ou moyen terme de la situation actuelle, compte tenu des délais qu'elle impliquerait et de l'utilisation extensive d'animaux de laboratoires qu'elle supposerait. Aussi pour dépasser les limites imposées par cette approche il est opportun de développer et d'évaluer la pertinence de nouvelles approches alternatives permettant une évaluation des risques telles que :

- les approches de gestion des risques fondées uniquement sur une évaluation graduée de ces derniers.
- les catégorisations par effets ou selon les propriétés physico chimiques
- l'approche dite « *safer by design / by process* » apparaissent comme des solutions alternatives intéressantes qu'il est nécessaire d'évaluer afin d'en démontrer l'efficacité

Toutes ces approches doivent par ailleurs s'accompagner systématiquement d'une évaluation de l'exposition tout au long du cycle de vie des nanomatériaux.

Tendances lourdes

Les tendances lourdes identifiées sont :

- la responsabilité des industriels : assurer le développement responsable, maîtrisé et sécurisé de ces nanomatériaux (ou encore développement durable) et des nanotechnologies en France
- le principe actuel d'études de toxicité : cas par cas
- le principe rénové : « *Safer by design / by process* »
- moins de médecins du travail
- l'absence de dispositifs biomarqueurs spécifiques de nanomatériaux

Incertitudes majeures

Les incertitudes majeures concernent les points suivants :

- les approches pour la mesure de l'exposition et pour définir les valeurs limites
- le développement de méthodes génériques HSE (*big data*)
- la traçabilité de l'exposition aux NST
- l'identification et traçabilité des produits contenant des NST dans le cycle de vie complet
- l'évolution des réglementations (et des définitions)

---

[126] *EC Requests Guidance on Safety Assessment of Nanomaterials in Cosmetics,* European Commission, 2011, http://nanotech.lawbc.com/2011/10/articles/international/ec-requests-guidance-on-safety-assessment-of-nanomaterials-in-cosmetics/

- les acteurs en charge de la gestion des risques (indus, académiques, pouvoirs publics…)?
- la corrélation entre les paramètres physico-chimiques et les résultats de toxicité et d'écotoxicité

Hypothèses prospectives

Les hypothèses suivantes viennent in extenso de la fiche « Risques pour la santé » rédigée par Monsieur Stéphane BINET (INRS) et Madame Nathalie THIERIET (ANSES) dans le cadre de l'étude prospective menée par l'INRS et intitulée « Les nanomatériaux manufacturés à l'horizon 2030 : Conséquences en santé et sécurité au travail dans les petites entreprises en France ».

Hypothèse 1 : Survenu d'effets sanitaires graves non anticipés

Cette hypothèse suppose une faible prédictivité des outils relatifs à l'évaluation des dangers (santé) et des expositions (mesure). Certains nanomatériaux (très répandus ou relargage accidentel) dont les dangers potentiels auront été sous-évalués ou ignorés induisent au terme de plusieurs années la survenue d'effets sanitaires et environnementaux graves et très médiatisés (scénario « Amiante »).

Hypothèse 2 : Les effets sur la santé ne sont pas spécifiques par rapport aux autres agents chimiques (pas de crise)

Cette hypothèse suppose une bonne prédictivité des outils relatifs à l'évaluation des dangers (santé) et des expositions (mesure). Les risques sanitaires, évalués a priori (avant commercialisation) sont établis comme très différents d'un nanomatériau à l'autre et, globalement, les nanomatériaux ne représentent pas un risque global pour la santé ou l'environnement spécifiquement plus élevé par rapport aux autres agents chimiques. Chaque nanomatériau se place entre les intervalles d'un continuum d'effets anticipés par la recherche en toxicologie : du plus grave au plus « anodin ».

Hypothèse 3 : Des effets sanitaires éventuels sans crise déclarée

Restrictions catégorielles de l'usage de certains nanomatériaux utilisés au plus près du consommateur (alimentation, cosmétique) car, même en l'absence d'effets sur la santé objectivés, il aura été prouvé que ces nanomatériaux se diffusent dans l'organisme et s'y accumulent.

Hypothèse 4 : Les risques sanitaires restent difficilement évaluables

Actuellement, l'écart de connaissances entre le progrès technologique et la recherche en nanosécurité est estimé à 10-20 ans. En effet, les recherches visent essentiellement à développer de nouveaux nanomatériaux et nanotechnologies, alors que les moyens alloués (tous secteurs confondus, public ou privé) aux recherches sur leurs effets potentiels sur la santé sont insuffisants. Dans le cas où n'émergerait pas d'outil à haut débit d'évaluation des dangers (toxicologie…), cet écart se maintiendra ou sera susceptible de croître.

Hypothèse 5 : le danger est connu, l'exposition est connue (pour une application donnée) le *safer by design/ by process* apporte une réponse permettant d'avoir une balance positive bénéfice/risque

7-5- Synthèse des hypothèses et scenarii

Variables	Hypothèses			
	Scenario 1	Scenario 2 (*variante du scenario 1)*	Scenario 3	Scenario 4
V1- Pôles R&D et de production mondiaux	H1	H3	H3	H2
V2- Demande et marché mondial	H1	H2	H4	H1
V3- Pilotage de la recherche et de l'innovation	H2	H3	H2	H1
V4- Relations académie/industrie	H2 & H3	H3	H4	H1
V5- Relations entre acteurs industriels	H4	H2	H1	H3
V6- Formation en NST	H2	H2	H3	H1
V7- Perspectives d'emplois en NST	H1	H3	H3	H2
V8- Perceptions des NST	H1	H1 ou H4	H1	H5
V9- Encadrement des NST	H1	H3	H1	H3
V-10 Risques et gestion des risques environnementaux et sanitaires	H3 & H4	H3 & H4	H5	H5

Figure 10 : Hypothèses choisies pour construire les scenarii