

Les aspects duaux des nanotechnologies

Peut-on envisager une Initiative Nanotechnologique Nationale (INN) ?

Comme pour toute rupture technologique, les nanotechnologies peuvent être appelées à satisfaire à la fois des besoins civils ou de défense. C'est pourquoi aux Etats-Unis a été mise en place en février 2000 la NNI, « National Nanotechnology Initiative » [1]. Comment cette problématique se présente-t-elle en France ?

par Jacques Boileau

Après avoir exposé dans une première partie en quoi consiste la « dualité », nous décrirons dans une deuxième partie une façon d'aborder par une approche matricielle le problème de prospective des interactions entre d'une part l'apparition de nouvelles technologies, et d'autre part la satisfaction de besoins évolutifs, actuels ou futurs. Dans une troisième partie, nous l'appliquerons aux nanotechnologies en passant en revue, compte tenu de leur domaine d'application, celles pour lesquelles le caractère de dualité (marché civil/défense) existe ou pourrait ou non apparaître.

Contraintes civiles et militaires

Il convient au départ de définir ce que signifie ici la dualité, les termes « dual » et « dualité » pouvant avoir plusieurs significations très différentes. Ici, la dualité part des différences entre la satisfaction des besoins du secteur civil et de ceux à prévoir pour la défense nationale, notamment aux plans économiques et financiers. Tant en matière de production que de recherche et développement (R & D), les budgets de défense sont fixés par la puissance publique qui définit la politique de défense de la nation et les moyens à y consacrer, tandis que l'activité économique liée aux recettes et dépenses du secteur civil est une activité de marché dépendant des consommateurs, des producteurs et des Etats. Un des objectifs des budgets de la Défense au niveau de l'Etat Français est d'optimiser les dépenses, c'est-à-dire de se procurer et de maintenir des moyens de défense efficaces dans les conditions économiques les meilleures [2], parmi les possibilités qui s'offrent à l'Etat figurent par exemple :

- L'« achat sur étagère » c'est-à-dire l'emploi direct ou après des modifications peu coûteuses, de produits ou de composants déjà existants, destinés normalement au marché civil.
- L'utilisation ou l'adaptation simple de résultats de recherche et de développement obtenus pour des applications civiles. On peut y ajouter le soutien par le budget de la défense, de recherches dans des centres et laboratoires civils possédant l'équipement et le personnel appropriés.

- On peut systématiquement citer la rétribution de brevets pris par l'Etat au cours de recherches militaires souvent en amont, lors d'applications pour le marché civil.

Lorsqu'il s'agit de recherches et études « en amont » la différence de leur conduite en fonction de l'usage final, civil ou militaire, s'estompe, et à la limite, les résultats peuvent s'appliquer indifféremment aux deux usages, ce qu'exprime le terme de dualité. Celle-ci est considérée comme une source d'économies pour l'Etat ; celui-ci peut donc avoir intérêt, par exemple en matière de R & D, à soutenir financièrement des actions entreprises dans le secteur civil, dans l'idée d'obtenir des résultats plus rapidement, et de mieux satisfaire des besoins de défense évolutifs.

Il y a d'autre part une volonté d'associer plus étroitement les activités de défense aux activités civiles, ce qui amène à approfondir le caractère de « dualité ».

Naturellement les marchés civils et militaires n'ont pas les mêmes caractéristiques et il faut en tenir compte :

- les besoins militaires correspondent à des décisions étatiques politiques et ne s'analysent pas en termes de marché et de consommation, contrairement aux besoins civils.

- Les produits et systèmes à usage de défense sont prévus de pouvoir avoir une longue durée de vie sans changement une fois qualifiés et fabriqués. Ils doivent pouvoir être fabriqués longtemps après leur « qualification », ce qui peut soulever le problème de la continuité sur longue période de la produc-

caractéristiques et il faut en tenir compte :

- les besoins militaires correspondent à des décisions étatiques politiques et ne s'analysent pas en termes de marché et de consommation, contrairement aux besoins civils.

- Les produits et systèmes à usage de défense sont prévus de pouvoir avoir une longue durée de vie sans changement une fois qualifiés et fabriqués. Ils doivent pouvoir être fabriqués longtemps après leur «qualification», ce qui peut soulever le problème de la continuité sur longue période de la production de toutes les matières premières (ou des sous-systèmes) entrant dans la fabrication des systèmes finaux, ou de leur conservation au stockage pendant de longues années : à titre d'exemple, l'assemblage de pièces dans un système à usage militaire (par ex. un hélicoptère) au moyen d'une colle : celle-ci, qui a été «qualifiée» au départ, doit pouvoir être fournie sans modification, des années plus tard par le fabricant ou se conserver en stock sans altération sur une très longue durée. On peut, plus ou moins, surmonter ces difficultés en définissant les spécifications sous un aspect fonctionnel, lorsque le produit initial qualifié a disparu et qu'il faut trouver un produit de remplacement, qu'il faudra d'ailleurs qualifier.

- Les quantités de matières premières ou de pièces en amont nécessaires pour fabriquer un système pour la défense peuvent être très variables d'une année sur l'autre, et notamment devenir très faibles, voire nulles, certaines années : l'industriel producteur de ces matières premières ou pièces d'amont peut en arrêter définitivement la fabrication s'il n'a pas d'autres débouchés ; s'il en a dans le marché civil, la nature des besoins du client peut changer : le producteur modifiera sa qualité en conséquence sans toujours se préoccuper du client militaire.

La prospective

Il s'agit maintenant d'avoir une approche matricielle des besoins et des avancées ou «ruptures» technologiques et de leur interaction possible.

Dans les applications civiles, les fabricants d'objets ou de produits sont très

attentifs d'une part aux besoins des utilisateurs, d'autre part aux progrès technologiques pouvant permettre de satisfaire ces besoins, voire d'en créer de nouveaux. Du côté de la défense, cette interaction existe aussi, bien que pour des motivations différentes : les responsables de la défense doivent se préoccuper de l'apparition de techniques ou de produits nouveaux («ruptures technologiques») qu'un adversaire éventuel pourrait mettre en œuvre, rendant obsolètes ou inefficaces les moyens de défense existants ou en cours d'étude ; ils doivent s'efforcer de réfléchir aux parades possibles. La période actuelle ne manque pas de tels exemples d'adaptation nécessaire de stratégies vis-à-vis de dangers nouveaux.

Il faut d'ailleurs avoir conscience de l'importance du temps : car dans un monde civil ou militaire, celui qui satisfait le plus vite un besoin recensé acquiert un avantage certain, qui peut même permettre sa survie.

Cette analyse prospective est d'ailleurs une préoccupation permanente de la Délégation Générale pour l'Armement (DGA). Elle a donné lieu, en coordination avec les Forces Armées, à l'établissement du « Plan Prospectif à 30 ans » (PP30). Celui-ci a pour objectif d'identifier les futurs systèmes d'armes dont les forces françaises pourront avoir besoin.

Pour essayer de suivre de façon un peu plus systématique ces interactions besoins/innovations, ou percées scientifiques ou technologiques, on peut imaginer diverses méthodes d'approche. L'une d'elles, que nous présentons ci-dessous, a été décrite dans la revue *Stratégique* [3]. Il s'agit d'une méthode utilisable en réflexion prospective. Du type « Bottom/up » + « Top/down », elle permet d'aller dans les deux sens, du besoin final de l'utilisateur à la percée scientifique novatrice et réciproquement.

Dans une première étape, on va recenser des besoins existants ou prévisibles, qu'ils soient du domaine civil ou de défense. Un point important, et souvent plus difficile qu'on ne pense, est qu'ils soient exprimés en termes de besoins et non en termes de solutions. Par exemple, plutôt que de dire «il faut anéantir un char» il est préférable de dire «il faut empêcher un char de rem-

plir ses missions», ce qui augmente le nombre des solutions éventuelles.

Ces besoins peuvent être d'ordre assez général et très vaste ou être plus ponctuels. Par exemple, en France, huit besoins opérationnels en matière de défense ont été exprimés [4], par exemple «CBR Commandement Conduite, Communication et Renseignement», Maîtrise du milieu aérospatial». D'autres besoins seront plus ponctuels tels que «Détection de mines». Dans ce dernier cas, le fait par exemple de préciser «par des méthodes électriques» élimine automatiquement d'autres solutions.

Dans le domaine civil, on trouvera par exemple l'amélioration de la circulation dans tel type de réseau de communications, la localisation rapide d'un véhicule ou d'une personne, une sécurisation des cartes bancaires, l'empêchement de la chute des cheveux... Certains domaines seront mixtes, comme par exemple le contrôle continu de la non toxicité de l'eau potable et de sa qualité. [Par exemple, à partir des huit besoins opérationnels de défense évoqués ci-dessus, il a été précisé une liste de « capacités technologiques », qui sont des sortes de familles de systèmes envisagés pour satisfaire ces besoins par exemple: « observation optique spatiale », « fusion de données », « lutte contre les agents biologiques et chimiques »...].

Il sera nécessaire, une fois le besoin formulé, en général une fonction à remplir, de préciser les contraintes auxquelles sont soumises les solutions éventuelles, les milieux, le stockage, les températures de fonctionnement, l'encombrement, l'entretien...

Pour essayer de satisfaire ces besoins, en tenant compte au mieux des contraintes, on peut envisager des systèmes possibles, plus ou moins complexes. Ceux-ci seront en général formés d'assemblages de sous-systèmes, qui peuvent engendrer des contraintes mutuelles entre eux, tout en devant concourir à la satisfaction du besoin exprimé. Ces sous-systèmes peuvent eux-mêmes être constituée de parties plus petites, et à la fin, on arrive aux matériaux entrant dans l'agencement de ces parties. D'autres aspects interviennent aussi, tels que les fournitures d'énergie, les transmissions et les traitements

d'information, les interactions avec les êtres vivants etc.

A l'autre extrémité, de nouvelles techniques, de nouvelles avancées scientifiques, de nouvelles découvertes apparaissent : par exemple de nouveaux matériaux polymères ferromagnétiques, des nanomatériaux, des supraconducteurs, des polymères inter-pénétrés etc.

Croiser les besoins aux découvertes scientifiques

L'approche décrite est de passer par une méthode matricielle. Dans un premier tableau matriciel, on réserve chaque ligne horizontale à des besoins ou éventuellement à des fonctions à remplir, et chaque colonne verticale à des systèmes (ou sous-systèmes) envisageables.

Dans le rectangle d'intersection d'une ligne et d'une colonne, on inscrit une mention ou un signe qui indiquera dans quelle mesure on pense que le système correspondant (imaginé ou proposé) pourra contribuer à satisfaire le besoin correspondant («oui», «peut-être», «partiellement», «à condition que...» etc., «non»).

Naturellement, si dans cette matrice, le système imaginé ou proposé n'existe pas sur le marché, il peut lui-même devenir un «sous-besoin», ou besoin intermédiaire, et, dans une matrice du même type, traité de la même façon.

Par exemple, un besoin pourra être formulé comme «possibilité de déploiement d'une antenne dans un objet volant inhabité». Des systèmes seront proposés comme possibles moyennant une consommation d'énergie. Il y aura donc besoin d'un générateur d'énergie, avec ses contraintes (masse, encombrement, nature de l'énergie fournie, durée...). Pour satisfaire ce besoin en amont dans son cadre de contraintes, il faudra passer en revue des sous-systèmes dont certains peuvent faire appel à des nanotechnologies existantes ou à créer ou à mettre au point, d'où la sous-matrice correspondante.

Dans un deuxième tableau matriciel, on porte pour chaque colonne verticale les mêmes systèmes ou sous-systèmes que dans le premier, et pour chaque

ligne horizontale, un produit nouveau, une technologie nouvelle, une avancée scientifique. A l'intersection, on notera dans quelle mesure ce produit, cette avancée... pourrait intervenir dans un sens favorable sur les performances du système correspondant. On verrait alors, en revenant à la première matrice, sur quels besoins cette avancée pourrait avoir un effet. Rien n'empêche d'ailleurs, sur une ligne horizontale supplémentaire, de se poser la question de l'interaction éventuelle de deux avancées scientifiques et de leur effet éventuel sur des systèmes : est-elle nulle, additive, ou y a-t-il un effet de synergie ? Naturellement, dans chaque rectangle des matrices, on peut préciser par exemple les domaines de validité des performances, les délais estimés pour obtenir des résultats etc...

On remarquera que des avancées ou découvertes sur les matériaux sont souvent particulièrement intéressantes pour améliorer ou rendre viables des sous-systèmes et systèmes ou créer des systèmes nouveaux (par ex. protection du combattant, navire tout électrique...).

Cette méthode matricielle permet de faciliter les réflexions imaginatives et créatrices. Elle facilite l'examen des diverses nanotechnologies et leur application possible soit à des usages purement de défense, soit à des usages uniquement civils, soit plus ou moins aux deux, d'où alors un caractère dual. C'est ce que nous allons examiner dans une troisième partie.

Dualité des nanotechnologies

Rappelons d'abord en quoi elles consistent, ce point étant largement développé dans les autres articles de ce numéro.

Il existe plusieurs formes de produits nanotechnologiques :

- Nanomatériaux particuliers à trois (nanograin) ou deux dimensions nanométriques (nanotubes, nanofils, nanobâtonnets) ;
- Matériaux nanostructurés macroscopiques, préparés tels quels directement, dans lesquels se trouvent des particules

nanométriques, formant un matériau composite.

- Revêtements à épaisseur nanométrique d'une surface par un produit différent ; traitement de ces surfaces ou revêtements à l'échelle nanométrique : gravure, formation de multicouches ;
- Assemblages de parties diverses à l'échelle nanométrique, soit entre elles (par ex. nanojonctions) soit pour obtenir des dispositifs et des systèmes fonctionnels (électronique, optique, senseurs, muscles artificiels...).

Les techniques d'élaboration et d'assemblage, pour ces quatre types de produits, peuvent être différentes, notamment par l'échelle des quantités produites ou susceptibles d'être fabriquées, d'où des conséquences importantes sur la disponibilité en quantité, qualité, reproductibilité... pour les besoins civils et de défense.

Les techniques de fabrication sont par voie chimique, physique, mécanique, éventuellement biologique : condensation de vapeurs (exemple : aluminium), broyage, passage par voie colloïdale (technique sol-gel avec éventuellement traitement chimique subséquent, synthèse chimique (dentrimeres...), synthèse pas à pas (gènes...), dépôt en phase vapeur, synthèse en présence de protéines. Parmi les techniques d'assemblages figurent des traitements photochimiques par faisceau laser.

Les innovations peuvent survenir soit au cours de l'étude de produits par observation de propriétés nouvelles, soit par l'obtention de produits nouveaux (par ex. colloïdes de nanoparticules de nickel ferromagnétiques, nanocristaux de terres rares...) soit dans une amélioration nette, voire une percée technologique dans les techniques de fabrication, par exemple si elles ont un effet positif sur les prix de revient, les qualités (performances, durées de vie...) et la disponibilité, facteurs importants pour les besoins de la défense.

Ce sont ces innovations qu'on peut introduire dans les deuxièmes matrices citées plus haut, pour analyser leurs effets sur les systèmes.

Domaines d'application

Les techniques de fabrication sont par voie chimique, physique, mécanique, éventuellement biologique : condensation de vapeurs (exemple : aluminium), broyage, passage par voie colloïdale (technique sol-gel avec éventuellement traitement chimique subséquent, synthèse chimique (dendrimères...), synthèse pas à pas (gènes...), dépôt en phase vapeur, synthèse en présence de protéines. Parmi les techniques d'assemblages figurent des traitements photochimiques par faisceau laser.

Les innovations peuvent survenir soit au cours de l'étude de produits par observation de propriétés nouvelles, soit par l'obtention de produits nouveaux (par ex. colloïdes de nanoparticules de nickel ferromagnétiques, nanocristaux de terres rares...) soit dans une amélioration nette, voire une percée technologique dans les techniques de fabrication, par exemple si elles ont un effet positif sur les prix de revient, les qualités (performances, durées de vie...) et la disponibilité, facteurs importants pour les besoins de la défense.

Ce sont ces innovations qu'on peut introduire dans les deuxièmes matrices citées plus haut, pour analyser leurs effets sur les systèmes.

Domaines d'application

Ils peuvent se concevoir à partir des propriétés suivantes des nanomatériaux :

- effets de surface, dus à l'énergie superficielle des particules, qui devient importante devant l'énergie volumique et qu'on n peut donc plus négliger,
- effets dus à la taille des particules par exemple vis-à-vis des longueurs d'ordre de radiation lumineuses,
- effets importants provenant de l'allègement des systèmes, par une utilisation beaucoup plus complète et plus fine des propriétés de la matière,
- effets dus à la géométrie des particules : c'est le cas des nanofibres (effet de renforcement de propriétés mécaniques) ou de nanotubes notamment de

carbone, à l'intérieur desquels on peut loger d'autres molécules qui pourront être dégagées à la demande (par ex. hydrogène).

Pour ce qui concerne plus spécifiquement la défense, voici quelques domaines où des besoins existent et où les nanotechnologies peuvent apporter une contribution [4] :

- Matériaux énergétiques

C'est lié entre autres à une plus grande rapidité de la fourniture d'énergie ; par combustion, par exemple dans les propulseurs pour fusées (cas du nanoaluminium), dans des compositions pyrotechniques du type thermite (obtention rapide de températures très élevées) ou de feuilles très minces aluminium-nickel, ou ayant des décompositions se rapprochant de l'idéalité. Un autre secteur d'intérêt est une diminution de la sensibilité au choc d'explosifs sensibles (pentrite). Ces nanomatériaux peuvent avoir aussi un intérêt dans des compositions pyrotechniques à usage civil.

- Protection du combattant

Celle-ci peut être obtenue :

- par l'amélioration de propriétés mécaniques combinée à un allègement, dans la mise au point de vêtements et visières pare-balles.

- Par la miniaturisation des appareils de communication et de traitement de l'information, éventuellement la mise au point de petits ordinateurs, détecteurs..., tous individuels, portable ultra légers ; on peut ainsi envisager des appareils personnels donnant la position géographique du porteur.

- Par l'emploi de systèmes de délivrance programmée de médicaments dans l'organisme ou de nanocapsules d'antidotes introduites dans des pommades antitoxiques.

- Détection et transmission de l'information, gestion des communications

Elles peuvent être facilitées par la mise au point de dispositifs optiques et ou électroniques très allégés tels les nanosenseurs, avec les transmissions par exemple par drogues ; les stockages et les traitements de l'information en

temps très rapide sont des besoins importants. Les nanosystèmes sont envisageables en cryptologie. Signalons aussi les problèmes de détection opto-électroniques de toxiques.

- Actions télécommandées

Par exemple pour le déploiement d'antennes, des mises en marche ou arrêts de divers dispositifs à distance, sur des objets volants, ou sur des systèmes sous l'action d'un senseur percevant une menace, ou encore pour des robotisations sans personnel présent, par exemple pour du déminage. Des systèmes possibles sont du type « muscles artificiels » ou « actionneurs ».

- Appareils aéronautiques et spatiaux

Outre des systèmes cités dans les paragraphes précédents, on recherche l'allègement des structures, des appareillages, des revêtements, tout en ayant de très bonnes propriétés mécaniques, des tenues aux radiations etc.

- Fourniture d'énergie

Il existe un besoin intermédiaire pour la satisfaction de certains besoins précédents : c'est l'allègement et la maîtrise de la fourniture d'énergie, avec la mise au point de dispositifs correspondants, qui dépendront naturellement des caractéristiques de l'énergie à fournir (durée, intensité, environnement...)

Ces besoins peuvent être introduits dans des matières du premier type citées en deuxième partie de cet article. On peut ainsi chercher à apprécier le caractère dual actuel, futur ou évolutif des diverses nanotechnologies, en tenant compte de la nature des besoins de la défense et de la possibilité de les satisfaire directement par des systèmes civils sur le marché (achats sur étagère...) ou en modifiant ces systèmes par suite de conditions d'emploi nettement différentes, ou en créant des systèmes à partir de nanotechnologies ou de sous-systèmes civils existants (composants par exemple), cette analyse peut aussi permettre de déceler si des études à faire en amont dans le secteur civil peuvent avoir une utilité dans le secteur de la défense, soit directement, soit

moyennant des mises au point simples ou plus ou moins longues et aléatoires. Il faudra aussi tenir compte des caractères particuliers à l'intérieur de ce « marché civil », notamment pour déterminer la nature et l'origine des financements de R & D correspondants. Par exemple, le marché des téléphones portables est très différent de celui des satellites civils, la dépense correspondant à ce dernier marché étant de caractère assez analogue à celles concernant les satellites militaires : l'origine des financements de la recherche et des fournitures peuvent alors résulter de discussions entre secteur civil et secteur de la défense : il s'agira d'une « dualité » à caractère plus financier que technique.

Une bonne connaissance des besoins, un suivi de résultats de recherches dans le monde et une étude prospective correspondante (analyse besoins vs avancées scientifiques) présentent l'intérêt d'avoir des éléments pour le choix de solutions plus économiques dans des délais plus rapides et en tenant compte des caractères particuliers des besoins de défense. ●

BIBLIOGRAPHIE

[1] National Nanotechnology Initiative. [Report by the National Science and Technology Council. Committee on Technology février 2000 - Washington DC

[2] Revue Scientifique et Technique de la Défense (RSTD) n° 61 (octobre 2003) p. 3 à 109. (ECPAD - 2, route du Fort - 94205 IVRY-SUR-SEINE cedex, Tél. 01 49 60 52 44) : le SREA et la Recherche de Défense.

[3] Stratégique n° 2/88 p. 161 à 209 - Diffusion : la Documentation Française - 29/31, quai Voltaire - 75007 PARIS

[4] Défense n° 96 (décembre 2001) p. 29-30 - Revue bimestrielle de l'Union des Associations d'Auditeurs de l'Institut des Hautes Etudes de la Défense Nationale - BP 41 - 00445 ARMÉES - Tél. 01 44 42 40 10

Liste des systèmes de forces retenus pour la définition des besoins opérationnels de la défense : [2, p.20]

- Dissuasion
- Commandement, Conduite, Communication et Renseignement (CJR)
- Mobilité stratégique et tactique
- Frappe dans la profondeur
- Maîtrise du milieu aéroterrestre
- Maîtrise du milieu aéromaritime
- Maîtrise du milieu aérospatial
- Préparation et maintien de la capacité opérationnelle