



ÉDITION 2006

# Politique et Objectifs Scientifiques



DÉLÉGATION GÉNÉRALE POUR L'ARMEMENT

# Sommaire

<b>Synthèse</b>	p. 2
<b>Partie 1 : Enjeux et politique générale</b>	p. 5
> LA RECHERCHE ET L'INNOVATION, FACTEURS DE SUPERIORITE MILITAIRE	p. 5
> LA SYNERGIE NECESSAIRE ET CROISSANTE ENTRE RECHERCHE CIVILE ET RECHERCHE DE DEFENSE	p. 7
> UNE DEMARCHE OUVERTE SUR L'EUROPE ET LE MONDE	p. 8
> PERIMETRE ET OBJECTIFS DU POS	p. 9
<b>Partie 2 : Outils et ressources</b>	p. 11
> DISPOSITIF DE LA DGA EN MATIERE DE R&T	p. 11
> PROCEDURES ET OUTILS POUR LE SOUTIEN DE LA R&T DE BASE	p. 12
> LIENS AVEC L'ENVIRONNEMENT DE RECHERCHE NATIONAL ET INTERNATIONAL	p. 16
<b>Partie 3 : Orientations scientifiques</b>	p. 21
> INFORMATIQUE - MATHEMATIQUES - AUTOMATIQUE - TRAITEMENT DE L'INFORMATION	p. 22
> PHYSIQUE ET MECANIQUE DES FLUIDES ET DES SOLIDES	p. 27
> ONDES ET SYSTEMES ASSOCIES	p. 32
> ÉLECTRONIQUE	p. 37
> OPTIQUE ET PHOTONIQUE	p. 41
> MATERIAUX ET CHIMIE	p. 46
> BIOLOGIE	p. 51
> FACTEURS HUMAINS	p. 55
<b>Partie 4 : Axes d'effort pluridisciplinaires</b>	p. 61
> NANOTECHNOLOGIES ET NANOSCIENCES	p. 61
> ENERGIE	p. 63
> MODELISATION	p. 64
> BIOTECHNOLOGIES	p. 65
> PARTAGE DE L'INFORMATION	p. 68
> TECHNIQUES AVANCEES D'IMAGERIE	p. 68
<b>Glossaire</b>	p. 70

**Note sur le POS 2006 :** le présent document est la deuxième édition du POS. Il vise à provoquer une discussion entre la DGA et la communauté scientifique. Ce débat, enrichi des résultats des actions de recherche et d'analyse proposées, permettra de consolider la version ultérieure du POS, prévue en 2008.

# Synthèse

Puisque les transformations de l'outil de défense sont complexes et lourdes de conséquences, elles doivent être précédées d'une démarche prospective dont l'objectif est d'anticiper et de faire arriver à maturité les bonnes solutions technologiques pour un effet opérationnel optimal. La capacité d'intégration des technologies émergentes dans les systèmes de défense devient un facteur de supériorité. Elle doit donc être préparée très en amont, au niveau même de la recherche scientifique et technologique de base.

Dans cet esprit, pour préserver le long terme et tirer le meilleur parti des avancées scientifiques, la Délégation Générale pour l'Armement (DGA) s'efforce de consacrer environ 15 % de son budget d'études amont à la Recherche & Technologie de base et à l'innovation (1). Le document de Politique et d'Objectifs Scientifiques (POS) a vocation à orienter cet effort d'investissement.

Le POS présente les grandes thématiques scientifiques d'intérêt pour la Défense et les différents modes d'action permettant de soutenir ces thématiques en partenariat avec la recherche civile. C'est un document évolutif dont la réactualisation est prévue tous les deux ans.

Les orientations scientifiques proposées dans le POS se répartissent en deux catégories. D'un côté, on trouve les thématiques visant à lever des obstructions techniques majeures dans des domaines essentiels identifiés par la Défense. De l'autre, des thématiques récentes porteuses de ruptures technologiques potentielles, faisant souvent l'objet d'un « bouillonnement » mais dont l'intérêt pour la Défense reste à confirmer.

Parmi les thématiques suscitant un effort particulier peuvent être citées à titre d'exemple :

- la spécification et le contrôle des « systèmes de systèmes »,
- pour l'aide à la décision, le traitement des flux complexes d'information,
- la prédiction de mouvement des plates-formes navales pour la stabilité et l'aide à l'appontage,
- les techniques innovantes de détection et d'identification, notamment pour la sécurité,
- les nanotechnologies pour élaborer de nouveaux matériaux et de nouveaux composants,
- la conception de nouvelles bithérapies des fièvres hémorragiques virales,
- les développements des neurosciences dans la définition des nouveaux concepts des interfaces homme-systèmes intégrés.

L'orientation et le soutien de projets scientifiques prioritaires pour la défense s'appuient sur le développement de synergies avec la recherche civile, optimisées en terme d'investissement et de retour. L'objectif majeur est de s'assurer que les priorités scientifiques de la Défense sont couvertes, soit par la recherche civile, soit à la suite d'une intervention de la DGA auprès de ses organismes et écoles sous tutelle ou par des soutiens financiers directs à des projets ciblés.

Les actions engagées et à poursuivre visent notamment à :

- renforcer la concertation et les partenariats avec la recherche civile, notamment avec le Ministère de la recherche, l'Agence Nationale de la Recherche, le CEA, le CNES, le CNRS, l'INRIA et les acteurs du domaine de la santé ; intégrer la défense dans les réseaux de la recherche civile ;
- exploiter davantage le vivier des laboratoires et des PME innovantes et stimuler l'ouverture de voies nouvelles de recherche en soutenant des projets innovants ; conserver l'équilibre actuel de 15 % du budget des études amont consacré à la R&T de base ;
- former par la recherche par l'attribution de bourses de thèses (environ 400 thèses en cours) et de stages post-doctoraux ou de recherche à l'étranger, pour que davantage de jeunes chercheurs et ingénieurs apportent à l'industrie et aux laboratoires publics et privés des compétences intéressant la défense ; maintenir un taux d'insertion des doctorants DGA dans l'industrie supérieur à 50 % ;
- mobiliser, sur des priorités scientifiques identifiées, les compétences scientifiques des écoles et des organismes de recherche sous tutelle : ONERA, ISL (Institut franco-allemand de Saint-Louis), Ecole Polytechnique, ENSTA, SUPAERO, ENSICA et ENSIETA ;
- mettre en place de nouveaux types de partenariats pour développer et co-financer des actions de recherche, avec les industriels réalisant de la Recherche et Technologie de base, les pôles de compétitivité, les fondations de recherche, les Conseils régionaux et les autres acteurs de la politique régionale ; chercher tout particulièrement à tirer profit des capacités stratégiques et fédératrices des pôles de compétitivité à visibilité mondiale.

Dans une perspective d'ouverture internationale et de construction européenne, un volet essentiel de la politique se décline au niveau européen, plus particulièrement par des collaborations impliquant l'Agence Européenne de Défense (AED) et par des partenariats visant à valoriser pour la Défense les travaux de R&T de base du PCRD.

Afin de mesurer puis d'améliorer les retombées du POS, ses orientations scientifiques, les actions engagées et les résultats obtenus seront évalués par un groupe de personnalités et d'experts indépendants issus du monde industriel et académique. Une part de l'évaluation ne pourra être conduite que sur le long terme, au vu des avancées scientifiques et des ruptures technologiques découlant des travaux suscités ou encouragés par le POS, ainsi que de leurs applications au service de l'outil de défense ou de la société dans son ensemble. ■

.....  
(1) R&T de base : notion se référant aux niveaux de maturité technologique 1 à 3, tels que définis dans le référentiel international TRL (Technology Readiness Level).



# Partie 1

# Enjeux et politique générale

## LA RECHERCHE ET L'INNOVATION, FACTEURS DE SUPERIORITE MILITAIRE

L'adaptation permanente de la défense à l'évolution du contexte géostratégique et à celle de l'offre technologique est un défi où l'innovation est un gage de la supériorité militaire. S'il est admis que la technologie ne fait pas tout, les capacités opérationnelles futures de nos forces armées à moyen et long termes demeureront fortement dépendantes de l'investissement consacré aujourd'hui à la recherche et aux technologies de base. La capacité d'évaluation et d'intégration dans les systèmes de défense des technologies émergentes, souvent issues du monde civil, devient un facteur de supériorité.

L'objectif de la R&T de défense est de maîtriser en temps voulu les technologies nécessaires pour la réalisation des futurs équipements. Le Ministre de la Défense a affirmé sa volonté d'accroître cet effort au cours de la Loi de Programmation Militaire (LPM) 2003-2008, avec une évolution de 400 M€ de paiements en 2003 à 700 M€ en 2008. Pour tirer le meilleur parti des avancées scientifiques dans la préparation des futurs systèmes de défense, la DGA s'efforce de consacrer environ 15 % de ce budget à la Recherche & Technologie de base et à l'innovation. La notion de « Recherche & Technologie de base » se réfère aux niveaux de maturité technologique 1 à 3, tels que définis dans le référentiel international TRL (Technology Readiness Level - Cf. tableau n°1).

Bas	1	Principes de base de la technologie observés et décrits
	2	Concepts technologiques et /ou applications formulés
	3	Prédictions analytiques validées par des études en laboratoire ou théoriques
Moyen	4	Technologie du composant ou du sous-système de base validée en environnement de laboratoire
	5	Technologie du composant ou du sous-système de base validée en environnement représentatif
	6	Prototype ou modèle de la technologie système/sous-système fonctionnant en environnement représentatif
	7	Prototype de la technologie système fonctionnant en environnement opérationnel
Élevé	8	Technologie système qualifiée par des tests et des démonstrations
	9	Technologie système qualifiée par des mises en œuvre réussies en mission.



Augmentation de la maturité

Tableau 1 : échelle TRL

Cet investissement est essentiel pour préserver le long terme, identifier et évaluer aussi tôt que possible les nouveaux concepts et technologies porteuses de ruptures dans les performances ou les usages, limiter ainsi le risque d'impasse ou de retard préjudiciables au plan industriel et opérationnel. L'ambition est d'identifier les germes des transformations utiles à la défense, puis de soutenir leur croissance dans les meilleurs laboratoires. Le document de Politique et d'Objectifs Scientifiques (POS) a vocation à orienter cet investissement, en s'appuyant sur les échanges avec la communauté scientifique.

Les actions de R&T de base présentent souvent des risques scientifique et technique importants. Leur unité de coût étant en moyenne faible, le risque global de cet investissement demeure cependant mesuré en regard des retours attendus. L'enjeu, lorsque l'intérêt pour la défense d'une avancée scientifique est mis en évidence, est d'accélérer son passage de la recherche vers les phases de validation et de démonstration, puis de développement si son intérêt est toujours confirmé. Pour favoriser l'intégration réactive des technologies émergentes dans les systèmes, les différentes phases de l'échelle TRL ne doivent pas être cloisonnées ou traitées en série, les travaux à un niveau TRL donné alimentant constamment des résultats de travaux conduits à des niveaux TRL inférieurs ou supérieurs. Ainsi, la plupart des programmes de recherche de la DGA intègrent en parallèle des actions couvrant des niveaux TRL différents.

### Quelques illustrations d'actions de recherche de base soutenues par la DGA :

#### Un prototype de libellule artificielle :

Chacune des ailes de ce nanodrone du futur est actionnée par 180000 "nanomuscles" en polycristal de silicium permettant une cadence de battements de quelques dizaines de hertz. Ce projet de micromécanique a fait l'objet d'un projet REI (Recherche Exploratoire et Innovation) et ouvre de nouveaux espaces dans le domaine de la miniaturisation. Il pourrait préfigurer à terme « l'œil » déporté du fantassin de demain.

#### Les techniques de retournement temporel :

Les techniques de retournement temporel des ondes acoustiques permettent de focaliser une onde à travers un milieu très hétérogène, en faisant revivre à cette onde les différentes étapes de sa vie antérieure et en lui faisant parcourir le chemin inverse de sa propagation. Ces techniques, initialement soutenues par la DGA pour des applications liées à la détection ou aux télécommunications sous-marines, ont des applications potentielles très nombreuses. La plus avancée concerne la réalisation d'un dispositif de contrôle non destructif de moteurs d'avions. De même, un système de lithotritie capable de poursuivre un calcul

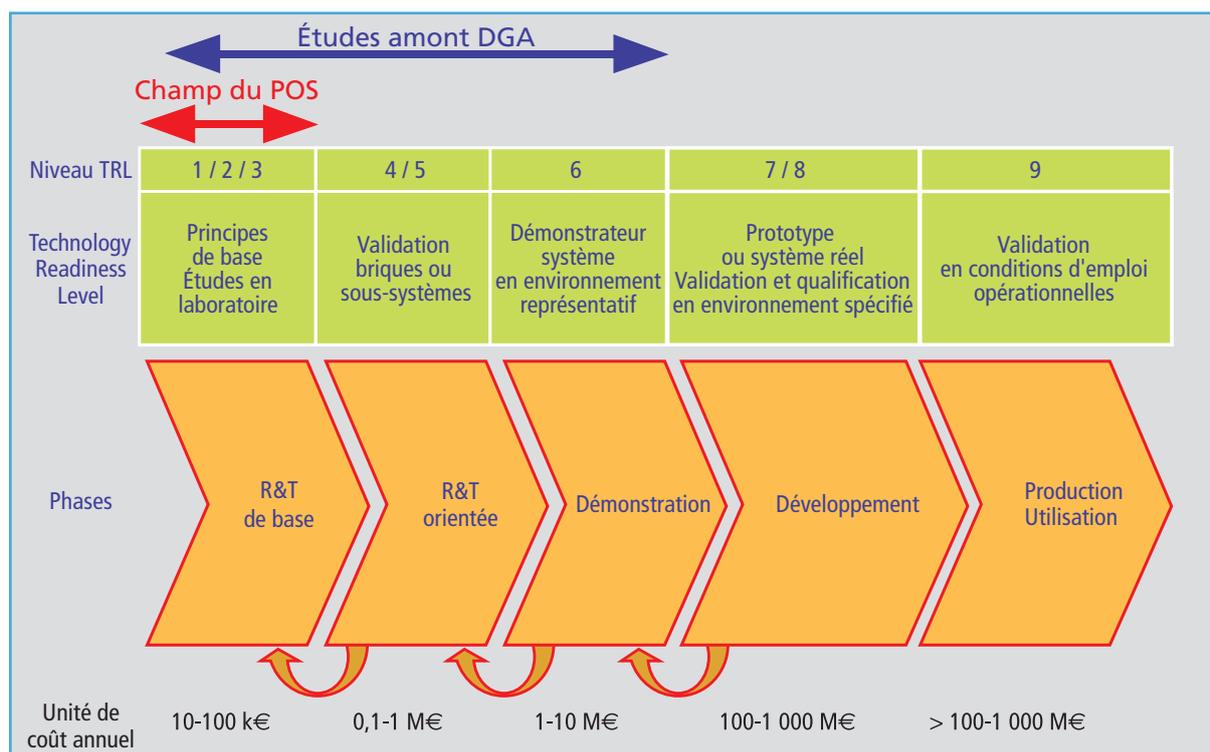


Figure 1 : maturation des technologies, de la recherche fondamentale aux programmes d'armement

rénal dans ses déplacements et de le détruire a été réalisé. D'autres applications sont en cours de développement dans le domaine de la chirurgie extracorporelle qui vise la mise au point d'une méthode d'hyperthermie ultrasonore du cerveau, capable de détruire sélectivement des petites tumeurs. Dans un avenir plus lointain, cette technique, qui semble transposable aux ondes électromagnétiques, ouvre la voie à de nombreuses autres applications.

#### **Rétine artificielle :**

Le projet portant sur un système de détection et d'identification automatique de cibles terrestres (véhicules et personnels) a débuté en 2003 et se terminera en 2008. Le système est conçu autour d'un capteur de réveil à base de rétine infrarouge programmable de basse consommation et d'un capteur principal associé à un PC. L'intégration d'unités de traitement d'images directement au niveau des détecteurs sur le plan focal de la rétine permet un parallélisme massif des processeurs « pixelliques », ce qui conduit à réduire fortement la puissance électrique consommée (quelques Watts) par rapport à un processeur CMOS unique (quelques dizaines de Watts), ceci grâce à la réduction de la fréquence de cadencement des traitements (MHz contre GHz) à capacité de calcul équivalente. La technologie de Rétine

Artificielle Programmable est originale au niveau international ; d'autres travaux sont menés pour le développement de rétines analogiques non programmables.

#### **Des biosenseurs fluorescents autonomes :**

La conception et la réalisation d'un anticorps fluorescent autonome par ingénierie génétique et chimique d'un anticorps de structure tridimensionnelle connue ont représenté un fait marquant des études amont, car elles laissent entrevoir un dépistage immédiat et fiable des agents du risque biologique. Ce principe d'anticorps fluorescents autonomes a été généralisé à des anticorps de structures inconnues, et des anticorps fluorescents autonomes sont testés dans des conditions d'utilisation sur biopuces.

#### **Immunostimulation :**

Suite à la diffusion du POS 2005, des projets ont été construits et lancés sur la discipline de modulation du système immunitaire, en se basant sur une stratégie de vaccination contre la surproduction de cytokines impliquées dans des pathologies autoimmunes ou infectieuses. Cette stratégie est potentiellement très intéressante pour stimuler le système immunitaire dans un contexte de stress opérationnel, afin de renforcer les défenses intrinsèques des individus à tout type d'agent pathogène du risque biologique naturel ou provoqué.

## **UNE SYNERGIE NECESSAIRE ET CROISSANTE ENTRE RECHERCHE CIVILE ET RECHERCHE DE DEFENSE**

Le progrès technologique dans ses retombées novatrices est à la fois poussé par l'offre (connaissances scientifiques) et tiré par la demande (besoins civils, militaires, sociétaux, économiques). La recherche et l'innovation technologiques de base ne sont au départ ni civiles, ni militaires, la différenciation n'apparaissant plus tardivement qu'en termes d'utilisation ou d'exploitation. De façon générale, plus l'effort de recherche se situe en amont des programmes, plus le résultat peut avoir un caractère dual.

Le nombre de domaines technologiques spécifiquement défense a tendance à diminuer fortement et continuera durablement à se limiter à quelques technologies très précises répondant à des besoins de supériorité ou caractérisées par l'absence de débouchés civils. La recherche et l'innovation resteront aspirées par le sillage de l'investisseur dominant du domaine. Il persistera toujours un décalage temporel entre les besoins civils et militaires, l'un pouvant alimenter l'autre et vice versa.

De nombreux travaux de recherches technologiques initiés par la défense ont ainsi des retombées notables dans le monde civil (santé, environnement, sécurité, énergie...) : dans le domaine des matériaux, les matériaux énergétiques pour lanceurs, les matériaux composites thermostructuraux carbone/carbone ; dans le domaine des composants, la technologie SOI (Silicium sur Isolant), les capteurs infrarouge non refroidis, les composants hyperfréquence à Arséniure de

Gallium ; dans le domaine de l'avionique, les commandes électriques, le traitement de la parole pour commandes vocales, la visualisation d'information sur cockpit ; dans le domaine des hautes énergies, les techniques de hautes puissances électromagnétiques pulsées, certaines technologies laser de haute énergie ; dans le domaine de l'information, les techniques de cryptologie, les travaux sur les algorithmes de perception et de commandes, notamment pour drones et robots, etc.

Dans la plupart des domaines, la technologie continuera à être tirée par le secteur civil, notamment en terme de coût en raison du volume potentiel des marchés concernés. Ainsi l'innovation des produits civils devrait permettre de réaliser des systèmes de défense dont les sous-ensembles évolueront le plus possible en phase avec le secteur civil, et donc d'accéder à une combinaison de gains en termes de performances, de coût, de réduction de délais, de garantie de disposer de la meilleure technologie à un instant donné. L'accélération du cycle des technologies conduit ainsi à intégrer successivement différentes générations de composants ou sous-ensembles nouveaux dans le produit final. La capacité d'intégration des technologies émergentes devient un facteur de supériorité. Autant il apparaît difficile de prévoir l'apparition de ruptures technologiques, autant il paraît indispensable de s'organiser pour les identifier et les exploiter au plus vite.

Dans les secteurs où l'impact de la défense reste nécessairement limité en regard des investissements considérables du secteur civil, la défense adopte un positionnement de suiveur réactif (« fast follower »), investissant au moment opportun pour adapter les technologies civiles à ses exigences, réduisant au besoin certaines de ses exigences pour des opérations militaires ne requérant pas de hautes performances mais des technologies bon marché rapidement disponibles. En matière de R&T de base, la défense peut alors se contenter d'une veille scientifique et technique associée à des actions ponctuelles pour éclairer des sujets insuffisamment développés.

La recherche civile ne réalise pas spontanément toutes les recherches de base dont la défense a besoin. Celle-ci doit donc se concerter avec les financeurs et opérateurs civils de la R&T de base pour s'assurer que ses orientations et besoins prioritaires sont pris en compte, et, le cas échéant, identifier et soutenir financièrement les actions de R&T de base nécessaires à la défense mais qui ne verraient pas le jour sans son implication. En contribuant à éviter les doublons et à favoriser les effets de leviers, cette concertation satisfait autant les intérêts de la défense que des acteurs civils.

Les synergies ne sont pas seulement d'ordre scientifique et technique. Les visions stratégiques civiles et défense portées sur le système de recherche et d'innovation convergent aussi en de nombreux points. Ainsi, la préservation des capacités scientifiques, technologiques et industrielles indispensables à l'indépendance nationale et européenne est une préoccupation de la défense intimement corrélée au développement d'un système de recherche et d'innovation performant. En termes de modes d'action, les initiatives en faveur de la recherche partenariale public-privé, des PME/PMI innovantes, de l'action régionale (pôles de compétitivité) ou de l'intégration dans l'Europe de la recherche intéressent tout autant la défense que le monde civil.

## UNE DEMARCHE OUVERTE SUR L'EUROPE ET LE MONDE

Face aux investissements américains et à la montée du potentiel scientifique asiatique, une politique scientifique à l'échelle européenne est nécessaire. La défense doit en être partie prenante car la « base scientifique » est un socle indispensable au maintien de la base industrielle et technologique de défense. Dans cette optique, la participation de la défense aux réseaux de la recherche civile européenne (PERS, PCRD...) continue à se développer. Dans le domaine défense, l'Agence Européenne de Défense (AED) devrait non seulement avoir l'ambition de piloter des démonstrateurs technologiques d'envergure, mais aussi des programmes de R&T de base. Même si ceux-ci n'ont pas la visibilité politique de démonstrateurs technologiques, ils n'en sont pas moins utiles pour consolider les capacités scientifiques indispensables au maintien à long terme de l'indépendance technologique européenne dans certains secteurs stratégiques pour la défense. Si le budget de l'AED devait croître significativement, un fonctionnement du type « DARPA (2) » pourrait être imaginé sous son égide.

La défense américaine a toujours eu une politique très volontariste en matière de R&T de base et les moyens financiers considérables qui lui sont consacrés en font un des moteurs majeurs de l'innovation dans le monde <sup>(3)</sup>. Au plan scientifique, la France et ses partenaires européens ont dans de nombreux domaines un retard limité, voire une avance sur les Etats-Unis ; ce positionnement doit être préservé et exploité pour mettre en place dans ces domaines des coopérations équilibrées.

## PERIMETRE ET OBJECTIFS DU POS

Dans le domaine de la R&T de base, le POS est le garant de la cohérence des actions engagées en interne DGA et de leur lisibilité à l'extérieur. A ce titre, il constitue un outil de dialogue interne défense et avec les partenaires externes pour faire savoir ce que souhaite la Défense et orienter puis valoriser les travaux qui l'intéressent. Sa vocation est double : identifier les thématiques scientifiques d'intérêt (avéré ou potentiel) pour la Défense, sans prétention d'exhaustivité et en étant ouvert à toute proposition d'enrichissement de la part de la communauté scientifique ; présenter la politique de la DGA en matière d'outils, de ressources et de partenariats pour soutenir les thématiques scientifiques identifiées.

Tourné vers la R&T de base, le POS n'a pas vocation à approfondir la politique de la défense en matière d'usage des technologies civiles, ni à aborder les modalités d'intégration réactive de nouvelles technologies dans les systèmes en développement ou en service. Il se positionne en amont de ces problématiques, qui lui sont néanmoins étroitement corrélées <sup>(4)</sup>.

Les principales données d'entrées du POS sont le Plan Prospectif à 30 ans de la Défense ; les plans stratégiques de la DGA ; les documents équivalents établis par des partenaires en France ou à l'étranger ; les feuilles de route des capacités technologiques de la Défense ; des éléments de prospective et de veille scientifique et technique ; les rapports scientifiques des laboratoires et des grands organismes de recherche ; les orientations scientifiques et techniques des industriels.

Le principe d'une évaluation externe de la politique scientifique de la DGA est proposé. Son objectif est de porter un avis et de formuler des recommandations sur les orientations scientifiques énoncées dans le POS, la qualité et la pertinence des actions engagées, le positionnement de l'action de la DGA dans le domaine des sciences et technologies de base par rapport à ses partenaires nationaux et internationaux, la qualité des résultats obtenus et le retour global sur investissement (capitalisation et exploitation des actions découlant du POS). Le groupe d'experts en charge de cette évaluation annuelle sera constitué d'experts scientifiques de haut niveau, proposés par exemple par l'Académie des Sciences, l'Académie des Technologies ou par le Conseil Scientifique de la Défense, et de personnalités et experts seniors du monde industriel et académique, nationaux et européens. ■

.....  
<sup>(2)</sup> Defense Advanced Research Projects Agency.

<sup>(3)</sup> Internet et le GPS : deux exemples emblématiques des retombées de la recherche de défense américaine. Le budget de R&T de base soutenu par la défense américaine est estimé à 800 M€ (source : Basic Research Plan).

<sup>(4)</sup> Le POS est un des volets d'un document plus vaste : le Plan Stratégique de préparation de l'avenir de la DGA. Ce plan intègre également des volets relatifs à la stratégie en matière de base industrielle, de coopération, d'exportation, de ressources techniques, ainsi qu'un Plan Stratégique de Recherche et Technologie de Défense et de Sécurité, document interne défense couvrant l'ensemble des activités de R&T de la DGA (TRL 1 à 6).



## Partie 2

# Outils et ressources

### LE DISPOSITIF DE LA DGA EN MATIERE DE R&T

La R&T de défense est orientée par le besoin. Ses grands objectifs, élaborés sur la base du Plan Prospectif à 30 ans (« PP30 »), sont décrits en termes techniques par la définition des capacités technologiques à atteindre à des horizons de 10 à 15 ans. Ces capacités technologiques sont sous-tendues par des feuilles de routes décrivant le chemin à suivre en terme de programmes d'études amont (PEA).

Les PEA sont des programmes de recherches et d'études appliquées, de nature technique, rattachés à la satisfaction d'un besoin militaire prévisible. Ils contribuent à maîtriser la base technologique et industrielle et la base étatique nécessaires à la réalisation des opérations d'armement, notamment par l'innovation, la réduction des coûts complets, la prise en compte de l'environnement et la levée des risques technologiques préalablement à leur lancement. Les études amont anticipent ou accompagnent le lancement d'une éventuelle opération d'armement nouvelle. Elles couvrent un domaine allant de la recherche et technologie de base jusqu'à la réalisation et la mise au point de démonstrateurs technologiques, expérimentations comprises.

Le nombre total de PEA en cours est d'environ un millier. Leur gestion globale est assurée à la DGA par le SRTS <sup>(5)</sup>. Ces programmes de R&T sont largement pluridisciplinaires, d'une part pour tenir compte de la complexité croissante des systèmes de défense, d'autre part pour susciter des ruptures en croisant plusieurs disciplines. La DGA s'est organisée en regard de ces enjeux de pluridisciplinarité.

Le suivi technique des travaux de recherche s'appuie sur une organisation par métiers des ressources d'expertise technique, présentes essentiellement à la DET et à la DE <sup>(6)</sup>. Les activités et compétences techniques de la DGA sont regroupées de manière homogène en 12 pôles techniques (11 pôles d'expertise technique et un pôle technique essais), permettant de mener de façon cohérente des actions d'orientation technique, d'animation de la fonction technique, d'exercice de l'autorité technique et d'optimisation des ressources humaines et des moyens techniques nécessaires.

SdS	Systèmes de systèmes
ASA	Architecture et techniques de systèmes aéronautiques
ASN	Architecture et techniques de systèmes navals
AST	Architecture et techniques de systèmes terrestres
ASC	Architecture et techniques de systèmes C3R
SSI	Sécurité des systèmes d'information
TEC	Télécommunications
MAN	Missiles, armes et techniques nucléaires de défense
SHP	Sciences de l'homme et protection
CGN	Capteurs, guidage et navigation
MC	Matériaux et composants
ESS	Essais

<sup>(5)</sup> SRTS : Service des recherches et technologies de défense et de sécurité.

<sup>(6)</sup> DET : Direction de l'expertise technique. DE : Direction des essais.

Une partie de la R&T de base (environ 30 M€) est placée sous la responsabilité scientifique directe de la MRIS <sup>(7)</sup> : veille scientifique et technique, soutien de la formation par la recherche, financement réactif de travaux de recherche et d'innovation scientifique. La MRIS est organisée en 8 domaines scientifiques, que l'on retrouve dans la structuration de la partie 3 du POS.

IMAT	Informatique – mathématique – automatique – traitement de l'information
PM	Physique et mécanique des fluides et des solides
ON	Ondes et systèmes associés
EL	Électronique
OP	Optique et photonique
MC	Matériaux et chimie
BIO	Biologie
FH	Facteurs humains

Les liens entre pôles techniques et domaines scientifiques sont précisés dans les encadrés introductifs de chaque chapitre scientifique (partie 3 du POS). Les interactions sont tout particulièrement essentielles en matière de veille, d'exploitation de l'information scientifique, de préparation des futurs PEA et de valorisation des résultats des travaux de R&T de base.



Figure 2 : principaux acteurs de l'orientation et du suivi scientifique et technique des programmes de recherche de la DGA

## PROCEDURES ET OUTILS POUR LE SOUTIEN DE LA R&T DE BASE

La recherche scientifique doit avoir pour objectif la connaissance pour la connaissance, suivant le modèle académique, mais elle doit également être au service d'une collectivité qui cherche des solutions à ses problèmes. Si la première démarche est indispensable, car elle vise à révéler les nouvelles lois, les nouvelles théories, la deuxième n'en est pas moins légitime. Son objectif est d'accroître les connaissances pour satisfaire des besoins de l'homme utilisateur de nouveaux objets, de nouveaux concepts, de nouveaux outils... Cette recherche est tout aussi indispensable.

.....  
<sup>(7)</sup> MRIS : Mission pour la recherche et l'innovation scientifique. Créée en 2005, dirigée par le conseiller scientifique du Délégué, cette mission élabore le POS, assure la lisibilité et la cohérence des actions de la DGA vis-à-vis de la communauté scientifique, et est chargée d'identifier, de développer et de capitaliser les actions de recherche et d'innovation dans le domaine des sciences et technologies de base.

De manière un peu similaire, les recherches et technologies de base soutenues par la défense résultent d'une démarche « descendante », tirée par les besoins de la défense et les objectifs des capacités technologiques cibles, et d'une démarche « montante », poussée par les avancées scientifiques et les opportunités technologiques qui en découlent. Les outils de la DGA permettent d'associer ces deux approches complémentaires.

## 1 - La R&T de base dans les Programmes d'études amont

La procédure des PEA est résolument « descendante », basée sur des appels d'offres ciblés, les cahiers des charges étant définis sur la base des besoins des armées et des capacités industrielles et technologiques visées. Les PEA s'inscrivent dans le cadre d'un programme pluriannuel global réactualisé tous les ans. L'orientation des PEA prend en compte un grand nombre d'éléments, dont les objectifs du POS et les résultats des actions suscitées par celui-ci.

L'effort financier est équilibré au regard de l'échelle des niveaux de maturité technologiques : sur le budget de 700 M€ prévu en 2006, environ 15 % est consacré aux recherches à caractère scientifique et d'innovation (« R&T de base », TRL 1 à 3) ; les acteurs en sont principalement les PME/PMI et les laboratoires de recherche, associés autant que possible à des industriels du secteur de l'armement. Environ 50 % concerne des études et recherches technologiques correspondant aux niveaux TRL 4 et 5. Les 35 % restant sont consacrés à des démonstrateurs technologiques (TRL 6). Les acteurs fédérant les travaux de TRL 4 à 6 sont principalement les grands industriels de l'armement. Au total les PME/PMI bénéficient d'environ 7 % du budget de la R&T de défense.

En matière de R&T de base, l'objectif est de maintenir le niveau actuel de 15 % de l'effort de R&T global. Afin de mesurer ce ratio, une action a été engagée en 2005 pour estimer les objectifs technologiques de chaque PEA en « TRL de départ » et « TRL cible ». Les contrats de R&T de la défense ne sont pas pour autant segmentés par niveau TRL. Les technologies de base préconisées dans les PEA ont en effet vocation à progresser rapidement sur l'échelle TRL, ceci étant d'autant plus vrai pour les technologies à cycle de vie court. Afin de favoriser leur intégration réactive dans les systèmes et la coopération entre acteurs industriels et académiques, les contrats « globaux », traitant à la fois des actions de TRL bas et de TRL élevé, sont recommandés.

→ Informations pratiques sur [www.ixarm.com](http://www.ixarm.com)

## 2 - Projets de Recherche exploratoire et innovation (REI)

Pour stimuler l'approche « montante », la DGA a mis en place fin 2004 une procédure baptisée « REI » - Recherche Exploratoire et Innovation - ouverte aux projets spontanés de laboratoires de recherche du monde académique ou industriel et aux PME innovantes, seuls ou de préférence en partenariat. Elle a pour but de maintenir l'effort d'innovation technologique sur des thèmes d'intérêt pour la défense, de stimuler l'ouverture de voies nouvelles de recherches et d'explorer des points durs scientifiques ou techniques en favorisant l'identification de ruptures. Cette procédure permet d'apporter un soutien maximum de 300 k€ TTC par projet, avec un objectif de délai de contractualisation inférieur à 6 mois. Un budget de 12 M€ lui est consacré en 2006 (9 M€ en 2005).

Bilan Recherche Exploratoire et Innovation		
Bilan entre le 22/09/04 (début de la procédure REI) et le 30/10/06		223 dossiers ont été soumis à la DGA 120 ont reçu un avis favorable en commission d'examen, dont 43 dossiers soumis par des PME

### 3 - Soutien de la formation par la recherche

En finançant des bourses de thèses, des stages post-doctoraux ou des stages de recherches à l'étranger, la DGA souhaite former, dans les domaines intéressant la défense, des ingénieurs ou des chercheurs afin qu'ils apportent ensuite leurs compétences à l'industrie et aux laboratoires publics ou privés.

Plus d'une centaine de nouvelles thèses sont financées chaque année, ainsi qu'une vingtaine de stages en France ou à l'étranger pour jeunes docteurs ou chercheurs confirmés, français ou étrangers. Cet effort a été renforcé en 2006 avec la mise en place d'une procédure de cofinancement de bourses de thèses avec le CNRS ; les modalités d'association d'autres partenaires (organismes de recherche, fondations, Conseils Régionaux...) sont en cours de définition. Par ailleurs, afin de fertiliser les échanges entre la DGA et les laboratoires de recherche, une journée de présentation des travaux des doctorants DGA est organisée annuellement et un prix de thèse DGA est décerné depuis 2002.

Bilan bourses de thèses	
Année 2005-2006	Année 2006-2007
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 243 dossiers examinés</li> <li>• 132 nouvelles bourses de thèses retenues (dont 13 en SHS <sup>(8)</sup>),</li> <li>• 7 bourses en cofinancement avec le CNRS</li> <li>• 360 thèses en cours pour un budget total de 12 M€</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 303 dossiers examinés dont 17 pour des bourses cofinancées</li> <li>• 129 nouvelles bourses de thèse retenues dont 13 en SHS</li> <li>• 9 bourses en cofinancement avec le CNRS</li> <li>• 389 thèses en cours à compter d'octobre 2006 dont 16 en cofinancement avec le CNRS</li> </ul>

Pour permettre aux doctorants de réfléchir le plus tôt possible à leur projet professionnel et à la valorisation des compétences qu'ils ont acquises pendant leur thèse, la DGA a, en 1995, initié et labellisé les Doctoriales®, formation soutenue par le ministère de la recherche. La DGA teste actuellement une formation complémentaire à la gestion de projet et l'entrepreneuriat, les « Entrepreneuriales », dans laquelle de jeunes docteurs, des cadres d'entreprises et des universitaires travaillent en équipe pour réaliser un plan d'affaire d'une jeune entreprise récemment créée.

Autres formations par la recherche soutenues par la DGA	2005-2006	2006-2007
stages Etudes et Recherche à l'Etranger	4 dossiers présentés et retenus pour un montant total de 130 k€	15 dossiers présentés et 8 retenus dont 1 DGA.
stages post-doctoraux à l'étranger	19 examinés, 11 retenus pour un montant total de 550 k€	26 examinés, 15 retenus
contrats Jeunes Chercheurs	10 dossiers examinés, 2 retenus pour un montant total de 85 k€	3 dossiers examinés, 3 retenus pour un montant total de 105 k€
stages post-doctoraux en France		5 dossiers examinés, 2 retenus

→ Informations pratiques sur [www.recherche.dga.defense.gouv.fr](http://www.recherche.dga.defense.gouv.fr)

#### **4 - Etudes confiées aux organismes étatiques sous tutelle de la DGA**

La DGA assure la tutelle de deux organismes de recherche reconnus au niveau international, l'ONERA et l'ISL. Les travaux de l'ONERA sont destinés à servir la compétitivité et l'innovation de l'industrie aéronautique, spatiale et de défense. Ils débouchent sur des codes de calcul, des méthodes, des outils, des technologies, des matériaux... L'ISL a pour mission d'effectuer des recherches et études scientifiques et techniques fondamentales dans le domaine des armements classiques. La DGA étudie avec ces organismes comment ils peuvent renforcer leur apport à la mise en œuvre de la politique scientifique de la DGA.

La DGA assure également la tutelle de 5 écoles : École Polytechnique, ENSTA (Paris), SUPAERO, ENSICA (Toulouse) et ENSIETA (Brest). Ces écoles rassemblent un potentiel de recherche significatif, ont des axes de recherche de niveau national, européen et international, et participent aux réseaux et structures fédératives comme les Pôles de Compétitivité. Les contrats d'expertise et d'études confiés à ces laboratoires relèvent principalement de la R&T de base. La DGA participe à l'orientation et à l'évaluation de ces travaux, ainsi qu'à leur coordination entre les écoles.

#### **5 - Concours universitaires européens**

Peu utilisés par la Défense en France, les concours universitaires permettent de tisser des liens nouveaux en mobilisant des étudiants et des enseignants, éventuellement associés à des PME, autour de projets porteurs d'innovation. L'effort sera poursuivi pour coordonner ce type d'action avec les partenaires civils (universités, autres ministères...) et obtenir une participation internationale accrue, par exemple, dans un premier temps, en s'associant aux concours universitaires sponsorisés par la Défense dans les pays anglo-saxons.

#### **6 - Soutien de manifestations scientifiques, de prix scientifiques**

Deux prix scientifiques sont soutenus par la DGA : le Prix Science et Défense et le prix Lazare Carnot, avec l'Académie des Sciences. La DGA apporte par ailleurs un soutien financier à des colloques scientifiques : 50 manifestations ont été soutenues en 2004 pour un montant de 157 k€. En 2005, 80 demandes de subvention ont été examinées, 57 ont été retenues, pour un montant total de 180 k€.

#### **7 - Veille, animation de réseau**

La DGA participe à des réseaux, observatoires, Groupements de Recherche et opérations de prospective, qui constituent des sources d'informations scientifiques et techniques essentielles et des forums où la défense peut faire connaître ses besoins à la communauté scientifique.

Chaque responsable de domaine scientifique de la MRIS anime par ailleurs un réseau thématique pour son domaine <sup>(9)</sup>. Les membres DGA et hors DGA de ces réseaux sont sollicités pour différents types d'actions : contribution à la veille S&T ; suivi des doctorants ; expertise et évaluation de projets soumis à la DGA ; organisation de séminaires ou journées scientifiques ; diffusion d'information entre la DGA et leur structure... Environ 1 M€ sont consacrés chaque année à des contrats d'expertise ou de veille scientifique et technologiques sur des sujets ciblés.

En liaison avec le Conseil Scientifique de la Défense, un groupe de veille scientifique pluridisciplinaire de haut niveau sera mis en place en 2007, avec la mission d'alimenter les réflexions de la défense et de conseiller la DGA sur les recherches de quelque nature que ce soit susceptibles d'intéresser la défense et spécialement celles susceptibles de favoriser l'émergence de ruptures.

.....  
<sup>(9)</sup> Exemple : le réseau « POLOQ », sur les lasers et l'optronique, créé en 1995, mobilise chaque année 50 à 100 experts des universités, du CNRS, de l'ONERA de l'ISL, des écoles sous tutelle DGA, des industriels et de la DGA, afin de produire un bulletin semestriel de veille S&T et de suivre les doctorants soutenus par la DGA.

Le caractère dual de la R&T de base conduit la DGA à rechercher une synergie optimale avec les partenaires institutionnels et les opérateurs de recherche civils, académiques et industriels. Les liens collaboratifs peuvent s'appuyer sur des relations contractuelles, des accords formels de partenariats ou la participation de personnels défense aux instances de la recherche civile, et réciproquement. Les partenariats peuvent se situer au plan stratégique (analyse stratégique, orientation, évaluation) et/ou opératoire (expertise, co-financement de projets, échanges de résultats, échanges de scientifiques).

### ***Avec les acteurs institutionnels et organismes de recherche nationaux***

Dans le cadre d'un protocole, le Ministère de la Recherche et le Ministère de la Défense se rencontrent régulièrement depuis 2001 pour échanger sur leurs orientations et pour définir des stratégies concertées et des modalités de coopération. Le programme de Recherche Duale (programme 191 de la LOLF, budget annuel de 200 M€) est une illustration de cette coopération.

La coopération avec l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) se renforce progressivement. La défense participe à plusieurs comités de pilotage de programmes de l'ANR et développe les échanges entre ses responsables scientifiques et techniques et leurs homologues de l'ANR, notamment sur les appréciations des thématiques à soutenir. La DGA participe également aux comités interministériels mis en place par la Direction générale de la recherche et de l'innovation (DGRI) pour préparer la programmation de l'ANR.

Avec les organismes de recherche, la DGA a des échanges suivis depuis longtemps, et a entrepris depuis 2004 de formaliser ces relations à travers des accords. Les objectifs sont d'échanger sur les priorités stratégiques ; d'assurer la cohérence, d'enrichir et de renforcer l'efficacité des coopérations existantes ; de considérer l'opportunité de participations croisées à des instances d'orientation ou de sélection à caractère scientifique ; de considérer ensemble les ressources et procédures financières mobilisables pour soutenir des projets communs. Ces accords peuvent aussi offrir un cadre pour établir, sur des thématiques données, des partenariats à plus long terme entre la DGA et des laboratoires de ces établissements.

Ainsi, le **CEA** et la DGA ont signé en mai 2004 un accord cadre sur l'ensemble des techniques qui sortent du cadre du développement de l'œuvre commune (arme nucléaire). 8 thématiques font l'objet de travaux ciblés bien avancés, complétés par un travail transversal qui se met en place sur le soutien aux PME et sur la recherche à long terme, la prospective et les ruptures. Le **CNES** et la DGA ont signé début 2005 un accord cadre sur la préparation du futur. Un renforcement significatif de la participation de la DGA aux comités de sélection et d'évaluation des projets du CNES est en cours. La Défense apporte par ailleurs des financements au CEA et au CNES à travers le programme Recherche duale de la LOLF : ces financements ont vocation à soutenir des projets de recherche duale identifiés par la DGA dans les programmes de recherche de ces organismes, le POS servant de guide vis à vis de l'intérêt scientifique défense.

Le **CNRS** et la DGA ont signé un accord en janvier 2005. Le Comité Directeur et le groupe de pilotage ont été mis en place mi-2005, et le renforcement concret des relations est engagé. Parmi les voies explorées, on citera les unités de recherche communes, les détachements réciproques d'ingénieurs et de chercheurs et le soutien commun à des bourses de thèses. L'**INRIA** et la DGA ont décidé d'étudier les thèmes potentiels de collaboration et les modalités associées. Les suites à donner dépendront des résultats de cette analyse. Dans le domaine de la santé, la DGA étudiera, en relation avec le Service de Santé des Armées, une consolidation de ses relations, notamment avec l'Institut Pasteur, avec lequel la DGA se réunit depuis 2004 dans le cadre d'un comité mixte, et avec l'**INSERM**.

Les programmes 2006 majeurs de l'ANR qui intéressent la défense sont les programmes Sécurité, Sécurité et informatique, Calculs intensifs et simulation (CIS), Audiovisuel et Multimédia, Nanosciences et nanotechnologies (PNANO), Matériaux et procédés (RNMP), Technologies logicielles, Télécommunications, Recherche et innovation en biotechnologies (RIB), Technologies pour la santé (TecSan), Hydrogène et piles à combustibles (PAN-H), Neurosciences.

Des relations sont engagées avec des Conseils Régionaux pour développer des actions scientifiques en partenariat. Deux axes initiaux sont explorés : le cofinancement de doctorants et de post-doctorants, et le cofinancement de projets de recherche, notamment de recherches exploratoires et d'innovation. Il n'est pas acquis qu'un cofinancement DGA-Région apporte un avantage net, sans ralentissement de procédures, par rapport à une situation où chacun prend en charge la totalité des projets qu'il soutient. Ce type de relations est nouveau et les modalités sont en cours de définition. Elles débutent de manière expérimentale avec quelques régions choisies sur la base des intérêts mutuels sur les deux axes cités ci-dessus. La DGA est ouverte à considérer d'autres axes de coopérations.

L'utilisation de certains grands équipements de la défense (tels que les bassins d'essais des carènes) pourrait intéresser la recherche civile : la DGA établira, en concertation avec le Ministère de la recherche, la liste de ceux qui lui semblent pouvoir s'inscrire dans cette catégorie. Les modalités d'usage de ces équipements seront à définir.

### ***Avec l'industrie et les pôles de compétitivité***

Les thèmes de coopération avec l'industrie portent notamment sur :

- l'identification des limites des filières technologiques actuelles, la veille sur les technologies émergentes, l'analyse des potentialités de ruptures, la définition conjointe de feuilles de routes technologiques ;
- l'évolution des processus d'acquisition de travaux de R&T pour gagner en réactivité dans des domaines d'innovation très rapides et accélérer le transfert de connaissances et de technologies de la recherche vers les équipes d'ingénierie ;
- le renforcement des dispositifs rapprochant l'industrie de la recherche académique ; la coordination des interventions de la DGA avec les actions de financement de laboratoires conduites par les sociétés ;
- la concertation et le soutien mutuel pour faciliter les coopérations scientifiques de Défense bilatérales et multilatérales en Europe.

Un groupe de travail DGA – CIDEF <sup>(10)</sup>, associant l'ONERA, est mis en place pour animer et coordonner les échanges avec les industriels réalisant de la R&T de base <sup>(11)</sup>.

Les pôles de compétitivité renforcent les relations entre les établissements d'enseignement supérieur et de recherche, les PME-PMI, les grandes entreprises et les acteurs institutionnels territoriaux à travers une approche fédérative. Une forte proportion des projets labellisés par les pôles relève de la R&T de base ou sont d'intérêt dual. Le dispositif permet d'éviter une somme de relations et de projets sans synergie et de travailler au contraire sur des projets fédérateurs, dans un contexte favorisant les cofinancements privés et publics de multiples origines avec une visibilité au moins nationale et souvent européenne. La DGA contribue financièrement, à hauteur de 45 M€ de crédits R&T sur 3 ans, au fonds interministériel commun mis en place pour soutenir le développement des pôles. Sur les 67 pôles labellisés en 2005, la DGA est correspondant défense pour 8 pôles <sup>(12)</sup> et chef de file interministériel de 7 pôles <sup>(13)</sup>. Ces pôles sont incités à coopérer

.....  
<sup>(10)</sup> Conseil des Industries de Défense Françaises

<sup>(11)</sup> Dans la continuité du groupe DGA-GIFAS (Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales) sur les ruptures technologiques

<sup>(12)</sup> Pôles MINALOGIC, MOVEO, Images et réseaux, LYONBIOPOLE, Sciences et systèmes de l'énergie électrique, Pôle des microtechniques, Mobilité et transports avancés, EMC2

<sup>(13)</sup> Pôles mondiaux System@tic et AESE (Aéronautique-Espace-Systèmes embarqués) ; pôles à vocation mondiale Mer Bretagne et Mer PACA ; pôles ELOPSYS, Photonique et Route des lasers

avec les structures collaboratives plus amont, notamment les nouvelles entités introduites dans la loi de programme de la recherche que sont les PRES (14), les RTRA (15) et les Instituts Carnot.

En synergie avec la démarche des pôles de compétitivité et dans l'esprit du lancement de PEA globaux (« multi-TRL ») fédérant des acteurs industriels et académiques, une réflexion devra être engagée sur la pertinence et les modalités de mise en place de structures fédératives orientées défense, s'inspirant, en l'adaptant aux spécificités françaises, du concept britannique de DTC (Defence Technology Center).

Enfin, la DGA explore les relations possibles avec les fondations de recherche, en particulier pour les cofinancements de projets ou de thèses.

### ***Avec les partenaires européens***

De nombreux forums permettent de stimuler les échanges en matière de veille et de prospective scientifique et technique. Dans le domaine défense peut être cité le groupe de travail des 6 pays (16) de la « Letter of Intent » sur les ruptures technologiques : il mène une réflexion collaborative (séminaires conjoints) et est force de proposition de thèmes de recherche à long terme pour de futurs projets R&T multilatéraux. Les résultats de ces travaux doivent contribuer à la réflexion prospective de l'AED et à l'élaboration de sa stratégie de recherche.

La participation de la DGA aux réseaux étatiques de l'AED permet d'y promouvoir des thèmes et des objectifs de recherche structurants pour la base industrielle et technologique européenne de défense. Le maintien du socle scientifique qui soutient cette base doit inciter les pays à promouvoir des travaux de R&T de base à l'AED, à l'instar des anciens programmes de recherche du GAEO ; un objectif consistant à consacrer 10 % du budget de l'agence à la R&T de base pourrait être visé à l'horizon 2010. Au-delà des 6 pays de la « Letter of Intent », il conviendra tout particulièrement d'associer à ces programmes de recherche les pays disposant de pôles d'excellence scientifique à défaut de capacités industrielles dans le secteur défense. A terme, l'utilisation par l'agence d'une partie de son budget pour lancer des appels à projets de type DARPA sur des thèmes de recherche à long terme et d'innovation doit être recherchée. Par ailleurs le concept d'Innovation Technologique en Partenariat (ITP) expérimenté en coopération franco-britannique gagnerait également, à l'avenir, à être porté par l'agence.

Au niveau bilatéral, les échanges de scientifiques, doctorants, post-docs sur des sujets intéressant la Défense seront développés en utilisant les procédures existantes (ERE, ESEP...) (17). Ce mode de coopération est particulièrement privilégié avec les Etats-Unis.

L'institut franco-allemand de Saint-Louis (ISL), exemple emblématique de coopération bilatérale de recherche de défense, offre les bases d'un futur centre de recherche européen dans le domaine de la défense et de la sécurité. L'ouverture engagée de l'Institut vers d'autres partenaires européens doit être poursuivie, tout comme son rapprochement de laboratoires académiques civils (18).

Une partie significative du PCRD intéresse la Défense, notamment les programmes relatifs aux sciences de la vie, à la génomique et aux biotechnologies pour la santé, aux technologies pour la société de l'information, aux nanotechnologies et nanosciences, aux matériaux multifonctionnels, à l'aéronautique et l'espace, au développement durable et, depuis le 7<sup>ème</sup> PCRD, à la sécurité avec le PERS (19). L'action de la DGA vis-à-vis du PCRD vise à :

- inciter les acteurs industriels ou scientifiques liés à la défense à participer aux projets du PCRD d'intérêt dual ; promouvoir la participation des organismes sous tutelle de la DGA et de la DGA elle-même à travers ses centres techniques ;

.....  
(14) Pôles de recherche et d'enseignement supérieur

(15) Réseaux thématiques de recherche avancée

(16) France, Royaume-Uni, Allemagne, Italie, Espagne et Suède qui réalisent environ 95% de la recherche de défense européenne.

(17) ERE : Etudes et Recherches à l'Etranger ; ESEP : Engineer and Scientist Exchange Program

(18) Une unité mixte ISL-CNRS est en cours de création dans le domaine des nanomatériaux

(19) Programme européen de recherche de sécurité

- prendre en compte dans le choix des projets scientifiques soutenus par la DGA, dans un cadre national ou en coopération, les complémentarités avec des projets du PCRD afin d'obtenir un effet de levier ;
- valoriser les recherches soutenues par le PCRD et préparer le cas échéant l'engagement de recherches appliquées consécutives, dans un cadre défense. L'organisation permettant de mieux exploiter les retombées pour la défense du PCRD est à mettre en place.

Enfin, il convient d'approfondir l'intérêt pour la défense des projets de R&T de base labellisés par le dispositif EUREKA, dont la DGA est membre du comité interministériel et cofinance des projets. ■



## Partie 3

# Orientations scientifiques

Les orientations scientifiques du POS sont en général issues de préoccupations déjà bien identifiées de la DGA, notamment à travers le PP30, mais elles concernent aussi des thèmes nouveaux dont l'intérêt pour la Défense est à confirmer. Les horizons d'application considérés peuvent parfois être ouverts au-delà de 2015 ou répondre au besoin, plus proche, d'une capacité technologique et à l'accompagnement scientifique des PEA qui y concourent. L'importance pour la DGA d'une thématique scientifique (technologie, fonction, phénomène physique, concept...) peut ainsi relever de 3 types d'enjeux :

- La thématique est déjà identifiée comme prioritaire, voire critique, pour la Défense. Elle résulte de l'existence d'un besoin capacitaire, opérationnel ou technologique, posant des questions ou des défis (gap à franchir, verrous) relevant des sciences et technologies de base. Le besoin défense relatif à ces thématiques est en général explicité dans un document d'orientation en entrée du POS (PP30, feuille de route de capacité technologique...).
- La thématique fait l'objet d'un « bouillonnement » au sein de la communauté scientifique, avec parfois de fortes potentialités de rupture, ou au contraire constitue un domaine émergent inexploré où la Défense peut encore être moteur, mais où l'intérêt reste à confirmer. Le soutien de la Défense vise dans ce cas à évaluer l'intérêt du sujet, avec un investissement financier limité et gradué par degré de maturité, en préparation d'un éventuel programme de R&T plus important.
- Le soutien de la thématique contribue au maintien de la base scientifique dans un domaine où la France et l'Europe ont un besoin stratégique de maintien ou de développement des compétences et des capacités de recherche et d'innovation. L'excellence des laboratoires académiques, industriels ou établissements de défense est alors requise (reconnaissance nationale et internationale). L'insertion dans ces équipes de chercheurs de haut niveau sensibilisés aux problématiques de défense entre dans cette catégorie d'enjeu.

Les orientations présentées ne constituent pas un catalogue fermé, mais une liste ouverte et évolutive. La DGA n'exclut pas de soutenir des propositions de recherche sur des sujets issus de la communauté scientifique et non évoqués dans ce document. A l'inverse, la mention d'une thématique prioritaire ne préjuge pas du soutien de la DGA à tout projet relevant de celle-ci, même s'il émane d'une équipe reconnue pour son excellence scientifique. Avant de décider du soutien financier d'un thème de recherche, la DGA vérifie si le besoin défense correspondant est pris en compte ou peut être pris en compte dans un cadre relevant de la recherche civile et s'efforce, le cas échéant, de mettre en place les liens permettant le suivi conjoint du programme, si nécessaire avec un renforcement de l'effort financier qui lui est consacré.

Dans chaque chapitre sont identifiées des thématiques prioritaires auxquelles la DGA veut apporter une inflexion particulière dans les deux années à venir.

# Domaine 1

## INFORMATIQUE - MATHÉMATIQUES - AUTOMATIQUE - TRAITEMENT DE L'INFORMATION

### Périmètre :

- L'informatique : ingénierie des systèmes, réseaux, sécurité, informatique quantique ;
- Les mathématiques ;
- L'automatique : contrôle et commande, optimisation, systèmes autonomes ;
- Le traitement de l'information : signal, parole, images et vidéos, analyse de scènes et reconnaissance des formes.

**Pôles d'expertise DGA concernés :** SDS, ASC, SSI, TEC, CGN + pôle Essais

Le domaine « Informatique, Mathématiques, Automatique et Traitement de l'information » (IMAT) concerne l'ensemble des disciplines nécessaires au transport, au traitement, à la transformation et à la restitution de l'information, puis les méthodes nécessaires à la maîtrise des systèmes de traitement de cette information, ceci afin de permettre la modélisation, l'étude, la commande et l'analyse en fonctionnement des systèmes artificiels et complexes auxquels on assigne une fonction donnée.

### PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES ET INTERET DEFENSE

Les applications Défense présentent souvent des exigences de performance en milieu contraint, de réactivité - voire d'évolutivité - face à un environnement réactif et de dimensionnement dans des systèmes de systèmes dont la prise en compte globale fait émerger de nouveaux problèmes scientifiques peu présents dans les applications civiles. Il semble alors nécessaire de soutenir les voies de recherche les plus prometteuses susceptibles de résoudre ces problèmes particuliers, les autres recherches étant naturellement intéressantes pour la Défense, mais montrant une impulsion suffisante. De ce fait, on trouve ci-après, dans une liste qui n'est pas exhaustive, quelques-unes des problématiques devant être soutenues :

- les problèmes liés à l'analyse, au contrôle et à la validation du comportement de systèmes dynamiques hybrides (c'est-à-dire dont la dynamique combine des équations d'évolution continue et des équations d'évolution discrète) n'en sont qu'à leurs débuts. De grands progrès restent à faire, au plan théorique et algorithmique, en vue de la maîtrise de tels systèmes que l'on retrouve dans de nombreux ensembles électroniques et informatiques de la défense (systèmes d'armes, essaims de drones, etc.). Cette thématique est aussi étroitement liée aux nombreux développements qui ont lieu en informatique et intelligence artificielle distribuée autour des « systèmes multi-agents ».
- la théorie des nombres (en particulier la théorie algorithmique des nombres), les mathématiques discrètes (combinatoire, théorie des codes détecteurs et correcteurs d'erreurs) et l'informatique théorique (théorie de la complexité) sous-tendent de nombreuses applications dans le domaine de la cryptographie et de la sécurité informatique, qui certes sont en partie duales, mais qui posent également des problèmes très spécifiques à la Défense (sécurité multi-niveaux, protection de l'information sur le très long terme...).
- les recherches fondamentales sur l'interaction entre calcul et physique quantique, et à plus long terme sur le calcul quantique, sont susceptibles de remettre fondamentalement en cause

les bases de l'informatique actuelle et, à ce titre, présentent un intérêt de long terme pour la Défense.

- du fait de l'évolution des systèmes d'armes et d'information vers l'interconnexion (en vue de leur exploitation, de leur mise à jour, etc.) et de l'utilisation massive de bases de données hétérogènes, les problèmes d'interopérabilité au niveau sémantique prennent une importance accrue et requièrent le développement de concepts, de langages et d'outils nouveaux. Les recherches dans ce domaine n'en sont qu'à leur début et, à côté des besoins civils importants, comportent nombre de spécificités défense qu'il importe de prendre en compte. Cette problématique concerne également la distribution de fonctions sur un ensemble de systèmes, en vue de permettre la création de boucles courtes entre des capteurs et effecteurs portés par différents vecteurs. Dans ce cadre, le développement d'outils méthodologiques est aussi à prévoir pour permettre la prédiction et le contrôle des comportements émergents susceptibles d'apparaître au sein de l'ensemble des systèmes alors interconnectés.
- l'analyse et l'interprétation de scènes constituent une problématique importante, avec de multiples approches qui se situent à la frontière du traitement d'images, de l'intelligence artificielle et de la modélisation des systèmes naturels complexes. En ce sens, la Défense propose une richesse de contextes d'application inégalée avec des exigences difficiles portant sur la réactivité, l'évolutivité, la précision et la rapidité d'exécution des systèmes qui la démarque du domaine civil. Les applications concernent aussi bien l'autonomie des systèmes robotisés que l'enrichissement des cartes, l'interprétation automatique du renseignement ou encore l'utilisation coordonnée des moyens d'observation.

## ORIENTATIONS SCIENTIFIQUES

### 1 > *Transport de l'information*

Quelle que soit sa nature, l'information doit être transmise (avec éventuellement des contraintes de prétraitement ou de compression) depuis sa perception jusqu'aux applications clientes, tout en maintenant son contrôle et le respect de son intégrité. Le traitement du signal et l'informatique sont alors des disciplines largement invoquées. Pour les applications Défense, on s'intéressera :

- à l'approximation de signaux, aux processus à invariance d'échelle, à l'estimation non paramétrique ;
- aux réseaux de capteurs et à l'adaptation du concept de réseau intelligent au contexte militaire ;
- aux problèmes de sécurité liés au multi-niveaux, par exemple pour la « radio logicielle » ;
- à la continuité et la qualité de service dans les réseaux (réseaux hétérogènes, ad hoc) ;
- au calcul intensif ;
- aux mathématiques discrètes (combinatoire, théorie des codes détecteurs et correcteurs d'erreurs) ;
- à la cryptographie (symétrique et asymétrique), à l'informatique et au calcul quantique ;
- à la stéganographie et au tatouage de l'information.

### 2 > *Traitement de l'information*

Le traitement de l'information rassemble un ensemble extrêmement large de disciplines qui doivent prendre en compte la nature de l'information et ce que l'on cherche à en extraire. On peut donc rassembler dans ce domaine le traitement du signal, celui de la parole et du langage, celui des images fixes ou animées ainsi que les techniques de traitement d'une information de plus haut niveau (par exemple, pour la reconnaissance de formes et l'analyse de scènes).

Les efforts en traitement de la parole et du langage doivent porter sur la généralisation de techniques ou l'introduction de nouvelles pour :

- la reconnaissance et le suivi de thèmes de parole (notamment en reconnaissance multilingue) ;

- la reconnaissance de la langue et du locuteur ;
- les systèmes de dialogue ;
- la reconnaissance d'entités spécifiques et de thèmes pour la recherche avancée de documents audio et textuel ;
- la traduction automatique écrite et orale ;
- les corpus pour le développement et le test des systèmes, et l'organisation d'évaluations objectives.

Concernant l'analyse de document écrits, les recherches doivent viser à étendre les bonnes performances des systèmes classiques de reconnaissance de caractères dactylographiés à la reconnaissance d'écriture manuscrite et de documents composites (mixte manuscrit, dactylographié, tableaux, etc.) ou dégradés, et doivent être accompagnées de la création des corpus et de l'infrastructure d'évaluation nécessaires à une démarche expérimentale rigoureuse.

Le traitement et l'analyse d'images doivent être abordés dans une perspective globale afin, notamment, de retenir des axes de développement de systèmes de vision cohérents et de leur associer des méthodes de définition, d'organisation et d'évaluation à partir de l'expertise des capteurs, des vecteurs de communication et des technologies. Dans ce but, trois aspects sont à considérer : les algorithmes, la construction de la perception globale et l'évaluation des systèmes de perception.

Nombre de techniques en traitement d'images, notamment en « bas-niveau », sont matures ou bien suffisamment étudiées par la recherche civile. Des approches plus novatrices sont :

- l'utilisation de méthodes inspirées de l'algèbre différentielle ;
- les méthodes multi-échelles, les méthodes variationnelles ;
- la formalisation de la perception pour l'analyse d'images.

Les nouvelles modalités d'imagerie (capteurs multispectraux, hyperspectraux, polarimétriques, ...) soulèvent des problèmes fondamentaux quant aux traitements de ces données. Historiquement, le traitement d'images est apparu dans un contexte d'images 2D et, de ce fait, les méthodes ne se généralisent pas naturellement à des dimensions supérieures et aux spécificités physiques particulières de ces nouvelles données. Des concepts nouveaux et des efforts mathématiques importants sont à promouvoir, notamment ceux faisant appel :

- au traitement du signal multidimensionnel ;
- aux méthodes pour l'imagerie polarimétrique ;
- aux méthodes stochastiques prenant en compte la géométrie ;
- aux méthodes pour les problèmes inverses.

Le traitement de la vidéo, omniprésent dans la conception des systèmes d'information, se trouve à la croisée de domaines divers, et peut bénéficier de réflexions globales en place d'une simple juxtaposition de techniques : par exemple, on privilégiera une approche globale des questions de compression, d'indexation et de protection de vidéos. Pour des points plus spécifiques, on retiendra :

- les méthodes prenant en compte les modèles physiques des phénomènes étudiés ;
- les extensions aux modèles markoviens (modèles à états mixtes, modèles conditionnels) associés à des techniques d'optimisation ;
- les nouvelles transformations redondantes permettant des représentations hiérarchiques des séquences compatibles avec l'extraction de descripteurs spatio-temporels ;
- enfin, les problèmes liés aux réseaux de capteurs.

Une perception globale, nécessaire à l'autonomie et à la robustesse des systèmes futurs, va nécessiter de s'appuyer sur des techniques exploitant l'information de haut niveau. La construction de cette information doit s'appuyer sur les données mesurées (signaux, images,

etc.) mais aussi sur l'ensemble des informations disponibles ponctuellement, avec toutes les déclinaisons du problème liées aux incertitudes de justesse et de disponibilité sur chaque information particulière. A ce stade, l'architecture du système de vision est également importante puisqu'elle conditionne ses capacités de réactivité, voire d'adaptation. Parmi les axes importants, on encouragera donc :

- la fusion des données et des images (avec des précautions concernant les données manquantes ou aberrantes) ;
- l'inférence statistique (notamment les approches algorithmiques) ;
- les approches mariant apprentissage et reconnaissance (et suivi temporel, pour la vidéo) ;
- les approches neuronales et connexionistes ;
- les méthodes pour l'analyse de scènes, celles intégrant la boucle analyse-synthèse ;
- les méthodes pour l'imagerie holographique ;
- les architectures de traitement et la vision cognitive.

Ainsi que nous l'avons mentionné plus haut, les techniques de traitement d'images devront être accompagnées de méthodes d'évaluation pertinentes et reconnues, ce afin de mesurer leur apport dans un système dont elles sont la clé de voûte et de permettre leur amélioration. Évaluer les performances d'un algorithme donné, c'est vouloir mesurer et quantifier sa réussite pour les missions habituelles du système dans lequel il doit être intégré, afin de le comparer à d'autres et de permettre des prédictions. Beaucoup de problèmes théoriques sous-jacents sont ainsi liés au contexte Défense, comme :

- le calcul des métriques de performance pour la détection et la reconnaissance d'objets ;
- la modélisation du système visuel humain pour différentes tâches et types d'images ;
- l'étude de la représentativité des mesures et la planification des tests ;
- la prédiction des performances des chaînes de traitement.

### **3 > Modélisation, étude et analyse des systèmes**

Les systèmes infocentrés permettant de mieux rassembler et transmettre l'information sous toutes ses formes doivent faire l'objet d'études approfondies. Les principales orientations scientifiques issues de l'informatique concernent les systèmes de systèmes, les réseaux, les systèmes distribués et les interfaces homme-machine. Les besoins issus des applications Défense sont concernés par :

- la spécification des systèmes complexes à logiciel prépondérant et les techniques de transformation des architectures logicielles en système (MDA, rétroingénierie) ;
- la modélisation et la vérification des systèmes (méthodes formelles, validation des systèmes probabilistes) ;
- l'étude des systèmes distribués pour les aspects touchant à la flexibilité logicielle, à la sûreté de fonctionnement et à la décision dans les systèmes asynchrones (ordonnancement distribué de tâches en présence de conflits, consensus exact et approché, diffusion et terminaison atomiques), à l'auto-administration, à l'auto-adaptation ;
- la sûreté des langages de programmation (typage, langages synchrones) et l'évaluation des logiciels (assertions, programmation par contrats, model checking) ;
- la modélisation des systèmes complexes, la prévision et le contrôle de leur comportement (nombreux composants, échelles de temps différentes et rétroactions évolutives).

### **4 > Commande des systèmes**

Dans le contexte Défense, les problèmes de planification et d'allocation de ressources sont parmi les applications potentielles des techniques d'optimisation. Les axes importants concernent :

- les méthodes relevant d'une approche combinatoire (incluant les techniques d'approximation) ;

- les méthodes multicritères ;
- les méthodes probabilistes ;
- la théorie des jeux.

Le déploiement coordonné de systèmes robotiques militaires au sein d'un même théâtre d'opération ou d'un même espace relève de la gestion d'un système de systèmes. Les facultés robotiques correspondantes à ce besoin opérationnel sont celles de l'autonomie et de la coopération. Les techniques scientifiques devant être étudiées sont :

- les techniques de synchronisation ;
- les systèmes à retard ou décrits par des équations aux dérivées partielles ;
- le calcul ensembliste garanti, l'analyse par intervalles, ainsi que les autres applications d'ingénierie.

Si les données utilisées pour la localisation et la navigation sont mises à profit de manière différente selon l'architecture de traitement, les points spécifiquement Défense se trouvent au croisement des domaines « informatique » et « traitement de l'information numérique ». Les techniques pour la coopération sont plus directement influencées par le contexte Défense. On s'intéressera, outre les approches et architectures classiques, également aux :

- systèmes évolutifs et reconfigurables ;
- systèmes inspirés du comportement animal (comme alternative à la commande classique) ;
- systèmes intégrant la simulation, la perception et l'interaction (comme en robotique médicale) ;
- aspects portant sur la coopération entre les robots et avec les opérateurs.

## **DOMAINES D' ACTIONS PRIORITAIRES**

### ***Méthodes pour les systèmes de systèmes***

Un sujet important en 2006-2007 concerne les méthodes et technologies utiles à la problématique systèmes et « systèmes de systèmes » (SdS). Un effort de synthèse et de positionnement dans ce domaine est en cours, auquel participe la MRIS en mettant en place des thèses et des études, et en s'associant à une école thématique. Les études et les thèses à privilégier concernent aussi bien la spécification et la vérification des systèmes que la modélisation des systèmes complexes.

### ***Synthèse d'information de haut niveau pour la veille et la sécurité***

Un programme de travail a été lancé sur la synthèse d'information de haut niveau à partir de masse de données complexes pour les applications de Défense et sécurité. Ce programme, qui se poursuivra en 2007, s'articule autour des thèmes suivants :

- 1) Analyse de scènes pour la surveillance de grandes zones par des réseaux de capteurs : il s'agit d'être capable de synthétiser l'information provenant de capteurs disséminés dans des environnements complexes urbains, par exemple des caméras non spécialisées. Les tâches à remplir sont celles de la détection de personnes ou de mobiles, de la reconnaissance de formes non supervisée, du suivi de trajectoires et de l'analyse de la scène globale. L'ensemble des informations extraites doit pouvoir être replacé dans un référentiel commun. Les problèmes scientifiques sont multiples et concernent aussi bien le traitement d'images que l'apprentissage statistique et la fusion de données, ce qui induit que la problématique ne puisse être que partiellement abordée par la recherche civile.
- 2) Analyse de masses de données non structurées : les structures qui sont présentes dans les bases de données de grande taille sont difficiles à extraire et à mettre en évidence. On s'intéresse donc à la construction de graphes relationnels, à leur analyse mais aussi à la visualisation des résultats d'analyse, qui sont souvent difficilement exploitables. Ce thème vise donc à permettre à un utilisateur d'analyser dynamiquement des réseaux sémantiques de provenance quelconque. ■

# Domaine 2

## PHYSIQUE ET MECANIQUE DES FLUIDES ET SOLIDES

### Périmètre :

Le domaine concerne les disciplines et thématiques suivantes :

- **Physique et mécanique des solides**

Chargements globaux et locaux, sollicitations à dynamique lente ou rapide (impacts, crash) ;  
Méthodes de dimensionnement des systèmes mécaniques : méthodes fiabilistes, lois de comportement, d'endommagement et de rupture des matériaux en régime statique et dynamique ;  
Matériaux et procédés de mise en œuvre innovants.

- **Physique et mécanique des fluides**

Écoulements aérodynamiques et hydrodynamiques (avec ou sans surface libre) autour de géométries complexes (engins, propulseurs et appendices) ;  
Propriétés locales d'écoulements : couche limite, turbulence, instabilités, contrôle... ;  
Écoulements multiphasiques ;  
Sillages aérodynamiques et hydrodynamiques ;  
Bruit des écoulements.

- **Transferts thermiques, énergétique, écoulements réactifs**

Sources d'énergie innovantes et systèmes propulsifs associés  
Écoulements turbulents réactifs multiphasiques instationnaires  
Combustion des moteurs : rendement, contrôle d'instabilités, réduction des signatures  
Explosions

**Pôles d'expertise DGA concernés :** ASA, ASN, AST, MAN, MC + pôle Essais

Le domaine regroupe des disciplines traditionnelles essentielles au développement de l'aéronautique, du naval et du transport terrestre, secteurs dans lesquels la défense a joué de tout temps un rôle moteur qu'elle doit conserver.

### PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES ET INTERET DEFENSE

Malgré une histoire déjà longue, de nombreux problèmes scientifiques restent totalement ouverts dans ces disciplines. Si l'amélioration des méthodes numériques a contribué au développement des connaissances, l'analyse physique reste la base de la compréhension. La difficulté des concepts et la diversité des sujets imposent de veiller à la vitalité des recherches académiques et à ne pas se limiter à la seule activité de simulation numérique. Une approche expérimentale jointe à la réflexion analytique est d'autant plus à privilégier qu'elle requiert les efforts conjoints de scientifiques de haut niveau.

Étendue aux systèmes réactifs et à l'énergétique, la mécanique des milieux continus concerne les phénomènes hors équilibre avec leur spécificité non linéaire (structurations spatio-temporelles, propagation de fronts réactifs, phénomènes de rupture, intermittence, vagues, sillages, traînées...). Ces disciplines se retrouvent aussi impliquées dans de nombreux secteurs autres que la défense, ou le transport, comme les sciences de la terre et de l'univers, la biomécanique...

Une attention particulière doit être portée sur les instabilités purement non linéaires, comme le déferlement des vagues, le décollement des couches limites, les écoulements transsoniques, l'éclatement tourbillonnaire ou encore la transition déflagration – détonation, sujets difficiles actuellement relativement peu étudiés et où l'analyse physique est essentielle.

Sur le thème « énergétique et systèmes réactifs », l'épuisement dans quelques dizaines d'années des réserves en hydrocarbure ne peut être ignoré de la défense. La production et le stockage de l'hydrogène ou de carburants de synthèse sont des questions évidemment duales mais vitales pour l'avenir de l'aéronautique. Par ailleurs, les explosions constituent évidemment un thème de recherche important pour la défense, et qui rejoint les préoccupations de sécurité.

En aval de recherches fondamentales, les travaux doivent permettre d'améliorer les méthodes utilisées pour la conception des systèmes mécaniques soumis à des environnements sévères : méthodes efficaces de prévision de performances, d'optimisation de formes, et de qualification de nouveaux concepts ou technologies. Les progrès scientifiques dans les différentes disciplines doivent contribuer à traiter des thématiques pluridisciplinaires associées à des phénomènes de couplage structure – fluide – thermique – acoustique – contrôle, relevant dans certains cas de plusieurs domaines scientifiques.

Ces domaines nécessitent la coopération de physiciens, de mathématiciens appliqués et de numériciens. Des programmes scientifiques pluridisciplinaires mettant en œuvre de telles collaborations doivent être encouragés : ils ont déjà fait preuve de leur efficacité, par exemple pour le fonctionnement des moteurs cryogéniques ou plus récemment pour la fusion par confinement inertiel.

Enfin, dans ce domaine scientifique, il est important de favoriser les échanges interdisciplinaires entre les secteurs aéronautique, naval et terrestre. En effet, un thème de recherche initié dans un secteur d'application peut éventuellement présenter un intérêt pour les autres secteurs. On peut noter qu'une initiative de ce type a été entreprise à l'OTAN, dans le cadre de la commission AVT (Advanced Vehicle Technology) de la RTO, qui s'efforce de fusionner les besoins des trois milieux.

## ORIENTATIONS SCIENTIFIQUES

### 1 > Dimensionnement des structures - suivi en service

Le dimensionnement des structures de systèmes de défense tels que les véhicules ou systèmes d'armes impose naturellement de s'intéresser aux matériaux qui sont à la base de toute réalisation (voir chapitre « Matériaux et Chimie »). Qu'il s'agisse de matériaux structuraux ou thermostrostructuraux, assurant éventuellement d'autres fonctions (absorbant acoustique, étanchéité thermique, ...), de matériaux énergétiques pour les systèmes de propulsion, il est essentiel de maîtriser leurs propriétés et leur comportement pour optimiser l'architecture d'ensemble des systèmes de défense.

Même pour des concepts architecturaux éprouvés, la recherche de réduction de coût, par exemple, ou encore de gain de poids, incite à utiliser des matériaux à leur limite, et à dimensionner les structures « au plus juste ». Pour le développement de nouvelles technologies ou de nouveaux concepts, les aspects matériaux et structures constituent très fréquemment une première source de risques à lever, et une première contrainte à respecter avant d'envisager de les adopter pour des systèmes futurs.

Les axes de recherche encouragés visent à pouvoir concevoir et réaliser des structures performantes tout en offrant une disponibilité opérationnelle accrue : sécurité, durée de vie, maintenance réduite, survivabilité. L'objectif à terme est d'aboutir à une approche « système » du dimensionnement des structures et de leur optimisation, en ayant recours à des outils de modélisation multiphysique et multiéchelle, et des approches statistiques ou probabilistes pour la modélisation de sollicitations complexes ou de la fiabilité des structures.

#### ***Fiabilité des structures***

Le dimensionnement « traditionnel » des structures fait intervenir l'application de coefficients de sécurité, prenant en compte forfaitairement diverses imperfections ou incertitudes, telles que les

défauts géométriques ou d'épaisseur du matériau, les aléas des conditions d'élaboration ou d'assemblage. Cette approche, largement fondée sur le retour d'expérience de systèmes en service, n'est pas satisfaisante pour des systèmes mécaniques où un degré d'innovation important est introduit, ce qui est fréquemment le cas des systèmes de défense (matériaux, optimisation de formes ou de poids...). Un domaine de recherche d'intérêt est l'emploi d'approches probabilistes ou fiabilistes du dimensionnement des structures, prenant en compte le caractère aléatoire des imperfections. La finalité visée est la possibilité d'utilisation de ces méthodes pour des structures représentatives de celles rencontrées industriellement, avec des temps de mise en œuvre adaptés au cycle de conception.

### **Analyse de la fatigue**

Un autre axe de recherche à soutenir concerne les méthodes d'analyse de la fatigue de structures soumises à des sollicitations complexes, par des moyens de calcul de durée de vie pour la phase de conception, et par le développement de systèmes de monitoring pour la phase de suivi en service (détection, caractérisation et suivi de l'évolution des endommagements).

Pour la phase de conception, la prévision du comportement vibratoire des structures est primordiale. Cela implique une connaissance précise de l'environnement dans lequel évolue la structure, et des sollicitations associées ; dans ce domaine, les besoins ont tendance à s'étendre à des configurations de déformations structurelles non-linéaires (ailes battantes pour micro-drones par exemple) sous l'effet de sollicitations dynamiques diverses et couplées (fluide, thermique, mécanique).

Pour le suivi en service de l'état des structures, les recherches dans le domaine des matériaux et des structures intelligents sont à encourager, en particulier le développement de capteurs ou actionneurs intégrés aux structures pour identifier l'apparition et l'extension de défauts (« health monitoring »).

### **Sollicitations dynamiques complexes**

Le dimensionnement des structures nécessite naturellement une bonne connaissance des sollicitations de la structure ; les efforts de recherche visant à améliorer l'évaluation des chargements dynamiques complexes sont à encourager. Les besoins, extrêmement variés, comprennent notamment : les phénomènes d'impact à dynamique rapide (solide/solide, fluide/solide) notamment des composites, les phénomènes hydro et aéro-élastiques, ou thermomécaniques, les explosions sous-marines... D'autre part, les technologies d'amortissement (passif/actif) constituent aussi un axe de recherche important.

## **2 > Mécanique des fluides**

Bien que cette discipline scientifique ait atteint une certaine maturité, des phénomènes physiques élémentaires constituent encore des « points durs » sur le plan scientifique, et nécessitent des recherches fondamentales pour aboutir à une meilleure compréhension de ces phénomènes, étape incontournable avant la modélisation ou la simulation. Par exemple, la transition d'un régime d'écoulement laminaire à turbulent est encore mal maîtrisée, et c'est un point essentiel pour prédire les phénomènes de décrochage ; ce phénomène de transition constitue une difficulté pour la prévision des écoulements autour d'ailes, d'aubes ou pour l'étude du vol à basse vitesse (bas nombre de Reynolds).

Au niveau des applications, les attentes des ingénieries de systèmes de défense (plates-formes et systèmes d'armes) sont extrêmement fortes. Pour de nombreux systèmes, les phases d'étude et d'optimisation multidisciplinaire d'un concept nécessitent de prendre en compte des objectifs ou contraintes relevant de cette discipline. Les contraintes de réduction de coût ou de durée des cycles de conception imposent de limiter, voire de supprimer, le recours à des démonstrateurs en exploitant de manière complémentaire des moyens d'essais et de simulation numérique.

La simulation numérique des écoulements complexes et/ou réactifs est une discipline qui a beaucoup progressé ces dernières décennies, et les efforts dans ce domaine doivent être poursuivis. La simulation des écoulements fortement instationnaires et turbulents est un axe important, ainsi qu'une meilleure prise en compte des aspects multiphysiques et des couplages. Les recherches doivent également contribuer à évaluer le potentiel de concepts ou technologies émergeant, par exemple de stratégies de contrôle actif d'écoulements utilisant des micro-systèmes mécaniques ou fluidiques, ou encore des plasmas, à des fins de réduction de traînée, d'hypersustentation, d'activation de mélange, de réduction de signatures...

Dans le domaine de l'hydrodynamique, les principales orientations scientifiques concernent :

- les écoulements à surface libre instationnaires à Reynolds élevé, autour de géométries complexes. Les principaux points durs sont de décrire les écoulements locaux autour d'appendices et de propulseurs et les efforts résultants, ou de prédire les efforts situation de manœuvre sur houle ;
- les écoulements diphasiques autour de navires et de propulseurs, pour l'étude des phénomènes de cavitation, des sillages de bulles ou sillages immergés en milieu stratifié et turbulent ;
- la mesure et la prédiction de l'évolution non-linéaire de champs de vagues en temps réel, des réponses dynamiques des plates-formes, et l'étude des phénomènes de déferlement des vagues ;
- l'hydrodynamique des corps remorqués ou d'engins sous-marins en phase de lancement ;
- des travaux plus prospectifs en magnétohydrodynamique.

Dans le domaine de l'aérodynamique interne ou externe, une attention particulière doit être portée aux thèmes suivants :

- écoulements turbulents instationnaires tridimensionnels à haut Reynolds, écoulements transsoniques, écoulements de jets ;
- instabilités d'écoulements et mécanismes de transition laminaire/turbulent ;
- phénomènes de décollement de couches limites, de décrochage de corps portant ;
- interactions d'ondes de choc ou d'ondes de chocs avec la couche limite ;
- dynamique des sillages tourbillonnaires (grandes échelles), éclatement tourbillonnaire, interactions tourbillons surfaces portantes ;
- aérothermique, aéroacoustique.

Une meilleure prise en compte des aspects multiphysiques, notamment les couplages avec la thermique ou l'acoustique, constitue un axe d'intérêt pour la défense, notamment pour la maîtrise ou la réduction des signatures. En matière acoustique, les thèmes de recherche à soutenir concernent les phénomènes de couplage aéro, hydro ou vibroacoustique, les phénomènes de cavitation. Les avancées recherchées concernent l'amélioration de la pertinence des modèles (simulation des sources acoustiques, et des mécanismes de propagation acoustique), et la prise en compte de conditions de parois complexes (matériaux absorbants, parois actives). Les stratégies et technologies de contrôle/réduction de signatures sont naturellement des thèmes d'intérêt.

Les écoulements réactifs (voir paragraphe suivant) nécessitent également la prise en compte d'aspects multiphysiques ; les écoulements réactifs, instationnaires turbulents et multiphasiques sont une problématique essentielle de l'aérodynamique interne des moteurs de plates-formes ou de systèmes d'armes : moteurs à propergols solides, aérobie (stato-fusée, statoréacteurs...), systèmes hybrides.

### **3 > Energétique et systèmes réactifs**

L'évolution des sources d'énergie est naturellement un thème de recherche crucial pour les applications de défense : production et stockage de l'hydrogène, de carburants de synthèse ou de biocarburants, micro sources d'énergie... Sur le plan scientifique, ce thème concerne plusieurs domaines, et fait l'objet d'un chapitre spécifique dans ce document (voir partie 4). Néanmoins, ce thème motive des axes de recherche plus spécifiques au domaine. Par exemple, l'utilisation de biocarburants nécessite des études approfondies sur l'atomisation, qui reste aussi un thème important pour la réduction des consommations. L'utilisation des plasmas pour améliorer la combustion (stabilisation des flammes pour les mélanges pauvres) est une voie fondamentale qui n'a pas encore été totalement explorée. En ce qui concerne le développement de micro sources d'énergie (propulsion des mini et micro drones par exemple), les micro turbines sont une voie à explorer.

Les technologies émergentes de l'énergétique constituent un axe de travail important pour l'optimisation des architectures des plates-formes de défense. La gestion de l'énergie embarquée et les technologies associées ont des effets induits de premier ordre sur les performances,

l'architecture et la fiabilité du système (autonomie, masse, volume...) et sur les ambiances générées. L'énergie embarquée constitue un véritable enjeu : stockage, conversion, restitution d'énergie à bord, employée à la propulsion et au fonctionnement des équipements et des commandes.

Les signatures acoustiques et thermiques des gaz de combustion restent des préoccupations fondamentales qui peuvent rejoindre des problèmes liés à l'environnement. A ce niveau, le contrôle de la combustion (combustion active) a certainement un rôle à jouer tout comme dans le domaine des économies d'énergie.

La modélisation multiéchelle et multiphysique des phénomènes de combustion des propergols est une problématique scientifique importante pour la défense. Elle peut donner naissance à des ruptures technologiques en matière de simulation et de maîtrise du fonctionnement des matériaux.

Les explosions, qui se retrouvent dans les problèmes de sécurité, constituent évidemment un thème de recherche de plus en plus important pour la défense ; d'un point de vue fondamental, c'est un domaine commun avec l'astrophysique. Les phénomènes physiques de base associés sont loin d'être compris, comme par exemple la transition déflagration-détonation. Les incendies et leur propagation sont également des préoccupations importantes : feux de nappe (pétrole), feux en milieu bâti, feux de végétation. Les phénomènes de rayonnement sont au cœur de ces problèmes, et concernent également la signature thermique des engins.

De manière plus générale, une approche scientifique « système », à caractère certainement pluridisciplinaire, est à prendre en compte pour ces thématiques ; elles relèvent d'ailleurs également du domaine Matériaux et Chimie, pour tout ce qui concerne les carburants, les matériaux pour l'allègement des structures (réduction de consommation) ou la réduction des émissions sonores (interactions fluide-structure).

## **DOMAINES D' ACTIONS PRIORITAIRES**

### ***Contrôle actif d'écoulements***

Ce thème concerne l'étude de stratégies de contrôle d'écoulement à l'aide par exemple de micro-systèmes mécaniques (MEMS) ou fluidiques, de plasmas, permettant de modifier la dynamique d'écoulements locaux (pariétaux) et d'agir par couplage sur les propriétés de l'écoulement de base ou de phénomènes couplés (signatures notamment). Ce thème fait déjà l'objet de travaux de recherche, soutenus par la défense ou des instances civiles, et ses applications prometteuses sont susceptibles d'offrir des perspectives intéressantes pour les systèmes de défense. En dehors des applications en combustion, les axes de recherche actuels visent majoritairement à explorer les applications potentielles pour le secteur aéronautique.

Le soutien à cet axe de recherche doit être maintenu, en se concentrant sur les voies les plus pertinentes en matière de conception aérodynamique future et, en parallèle, en explorant l'intérêt potentiel de cette thématique de recherche pour d'autres secteurs d'application. A un niveau plus académique, cette thématique permet d'aborder une physique nouvelle en mécanique des fluides (réaction locale d'un fluide à une micro-action), et d'améliorer par exemple la maîtrise de phénomènes transitoires peu connus.

### ***Prédiction de houle et de mouvements de plates-formes navales***

Pour la conduite d'opérations navales complexes telles que la mise en œuvre de l'aviation ou de systèmes d'armes, la possibilité de prédire la houle rencontrée par le navire et ses mouvements peut conduire à un gain opérationnel significatif (opérations sur états de mer sévères) sous réserve que l'horizon de prédiction soit de l'ordre de quelques dizaines de secondes ou quelques minutes. Contrairement au thème précédent, la communauté scientifique française a pratiquement abandonné toute recherche dans le domaine depuis la fin du programme PA-CdG, alors que des programmes de recherche importants ont été entrepris à l'étranger ces dernières années, en particulier aux Etats-Unis. Le but de l'intérêt accordé à cette thématique est donc de relancer un minimum de recherches au niveau français, compte tenu des avancées réalisées ces dernières années dans le domaine des capteurs et de la simulation de l'évolution non-linéaire de champs de vagues. La préparation en 2006 d'actions de recherche doit être poursuivie en 2007. ■

# Domaine 3

## ONDES ET SYSTEMES ASSOCIES

### Périmètre :

Le domaine couvre :

- L'acoustique,
- L'électromagnétisme.

Et les techniques de :

- Propagation - Diffraction – Rayonnement,
- Interaction- Modélisation,
- Antennes,
- Problèmes inverses.

**Pôles d'expertise DGA concernés :** CGN, ASC, ASN, SSI, TEC + pôle Essais

Qu'elles soient acoustiques, électromagnétiques ou optiques, les ondes nous entourent.

Le domaine scientifique « Ondes et systèmes associés » est vaste (de quelques Hz au THz). Son spectre ne couvre cependant pas le domaine optique, s'arrêtant à la « terra incognita », frontière artificielle entre les ondes radiofréquences et optiques. Les ondes, très utilisées dans le domaine civil, ont des applications militaires plus offensives telles que la guerre électronique ou les armes électromagnétiques. Elles peuvent se coupler aussi bien avec des systèmes matériels qu'avec des systèmes biologiques. Le domaine « Ondes » traite donc des techniques et technologies appliquées :

- aux télécommunications,
- à la détection,
- au guidage et à la navigation,
- à l'imagerie,
- à la guerre électronique,
- aux agressions et armes électromagnétiques,
- à la compatibilité électromagnétique.

### PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES ET INTERET DEFENSE

Trois phénomènes physiques de base sont communs à toutes ces technologies : la génération, la propagation et la détection des ondes. Ils mettent en œuvre des systèmes génériques (synthétiseurs, amplificateurs, antennes, détecteurs, capteurs,..) qui relèvent de technologies de base très transverses faisant parfois appel à d'autres domaines (électronique, composants, matériaux ...). Les enjeux du domaine consistent donc à détecter et promouvoir les technologies de base pouvant contribuer à l'amélioration des techniques existantes, ainsi qu'à dégager de nouvelles voies, avec pour perspectives :

- de communiquer, plus loin, discrètement, sûrement, en milieu perturbé (naturel) et agressif (guerre électronique), ce qui nécessite des sources d'énergie compactes, des fortes puissances, des technologies d'antennes intelligentes, adaptatives et impulsives,
- de détecter, d'identifier, de localiser, de visualiser, sans être vu : sonar ultra basse fréquence, techniques de retournement temporel, modes bistatiques, interférométrie, polarimétrie, matériaux furtifs adaptatifs,
- de perturber ou de détruire l'électronique : armes micro-ondes de forte puissance et armes électromagnétiques intelligentes.

Pour les applications défense, l'approche, tout en faisant appel largement aux outils numériques et à l'usage des solutions découlant des mathématiques appliquées, se référera aussi souvent que possible à la compréhension physique du problème et aux mesures déduites d'approches expérimentales.

## **ORIENTATIONS SCIENTIFIQUES**

### **1 > Génération des rayonnements**

#### **Générateurs**

L'amélioration de la portée des systèmes de transmission, de détection ou des armes électromagnétiques passe inévitablement par l'augmentation de la puissance des générateurs (jusqu'à quelques dizaines de GW), voire de l'énergie (jusqu'à quelques dizaines de kJ), tout en veillant à conserver des dimensions réduites aux systèmes. Les efforts à mener pour atteindre ces objectifs devront donc porter sur les sources primaires et les composants de base des générateurs hautes tensions (Marx, transformateurs de Tesla). Quelques pistes semblent porteuses : batteries énergétiques fonctionnant en régime impulsif, super condensateurs carbone de puissance pour applications en régime impulsif, ainsi que de nouveaux concepts de transformateurs résonants impulsifs permettant un gain de volume d'un facteur 10 par rapport au générateur de Marx classique.

Concernant plus spécifiquement la Guerre électronique, outre la puissance et l'énergie, un autre aspect dimensionnant est la prise en considération de la synthèse de fréquence (pureté spectrale, rapidité) et de la réception numérique.

#### **Rayonnement - Antennes**

Ce secteur est en évolution constante avec l'introduction de nouveaux concepts intimement liés à la mise en œuvre de nouveaux matériaux fonctionnels. L'amélioration du gain et des performances des antennes est un des facteurs clé pour accroître la portée. Parallèlement aux études menées aux Etats-Unis, notamment sur les antennes IRA (Impulse Radiation Antennas), des études pour explorer la capacité de ce concept innovant seront engagées. Il sera aussi porté attention à l'intégration des antennes à la structure des porteurs, concepts dans lesquels les propriétés du capteur ou du réseau de capteurs pourront profiter de la structure du porteur, lequel peut être un aéronef, un drone ou un navire. L'évolution des radars et des télécommunications demandera des antennes multivoies, multifonctions ainsi que des antennes et radômes très large bande. Un effort particulier devra être apporté sur les techniques de modélisation théoriques et de simulation des antennes et des interactions avec les structures proches.

Plus innovantes, les technologies MEMS (Micro systèmes électromécaniques), voire NEMS (Nano), ainsi que les matériaux BIE (structures à bandes interdites électromagnétiques) qui permettent de fabriquer des antennes angulairement et/ ou fréquentiellement sélectives devraient permettre d'atténuer fortement les ondes de surface sur le support, réduisant ainsi les couplages inter éléments. Dans le domaine micro-ondes, les efforts sur les cristaux métalliques utilisés comme support d'antennes (éventuellement intelligentes) ou comme antennes satellitaires et les cristaux reconfigurables, contenant éventuellement des éléments actifs, doivent être maintenus.

### **2 > Propagation**

Les études liées à la propagation Terre-Espace avec la mise en œuvre de nouvelles techniques de compensation des affaiblissements de propagation dans les bandes EHF, Ka et au delà restent à améliorer. Il faut également soutenir les efforts de modélisation théorique 3D de l'environnement de propagation en fréquences très basses [quelques kHz ] et en fréquences dites HF [ 1 MHz à 30 MHz], d'usage presque exclusivement militaire.

La connaissance théorique du canal doit être développée et les techniques de sondage de canal doivent être étudiées en particulier pour assurer les prédictions de canal court-terme de la future radio cognitive qui adaptera automatiquement son interface air aux besoins de communications et aux conditions de propagation et d'encombrement du spectre fréquentiel.

Les télécommunications acoustiques sous-marines sont très peu étudiées, mais il est certainement nécessaire de développer la connaissance du canal de propagation en mer profonde et en mer peu

profonde. De même les techniques multi-antennes appliquées aux communications acoustiques devraient permettre des débits de communications intéressants pour des applications militaires ou civiles.

Enfin, un effort doit être porté sur les problèmes de propagation terrestre en milieu perturbé ou en présence d'obstacles, de masques forestiers (couverture végétale et agricole), en milieu naval et en milieux urbains (hors immeuble mais aussi dans les immeubles à travers les murs). Les techniques de retournement temporel bien connues en acoustique, offre probablement un potentiel intéressant pour ces applications de télécommunication en milieux fortement hétérogène, notamment en régime impulsionnel (ULB).

### **3 > Détection – Imagerie - furtivité**

Les domaines acoustiques et électromagnétiques présentent des analogies que l'on utilisera.

#### **Détection acoustique**

Les travaux de recherche doivent se poursuivre dans les techniques d'imagerie acoustique (méthodes inverses) et de sonar ultra basses fréquences. Les outils et méthodes de la microsonique doivent permettre la mise au point de systèmes novateurs d'imagerie acoustique. Les sondes utilisées pour l'émission-détection d'échos ultrasonores, ainsi que les nouveaux guides d'ondes élastiques nécessitent non seulement le développement d'outils théoriques, mais aussi la recherche de nouveaux matériaux et de nouveaux transducteurs ultrasonores.

Les bandes interdites soniques (ou phononiques) révèlent des applications intéressantes, avec la possibilité de réaliser des barrières phoniques sélectives aussi bien en milieu marin que terrestre (protection des installations construites sur la mer contre les bruits sismiques par exemple).

#### **Détection électromagnétique**

Les différentes applications du SAR (Synthetic Aperture Radar) doivent être approfondies : images polarimétriques à haute résolution, image à très haute résolution en bande Ku, images obtenues en mode bistatique dont l'interférométrie est l'une des composantes. L'objectif est d'améliorer le pouvoir de résolution et l'identification des zones et objets illuminés. Ces études, dont l'objectif défense est évident, peuvent avoir des applications duales notamment pour la cartographie aérienne. Une attention particulière doit être apportée à l'analyse de cibles effectuée dans leur domaine de résonance à l'aide de systèmes impulsionnels très large bande (ULB), de type monostatique ou bistatique.

Les travaux de recherche sur l'imagerie à travers des masques (feuillage : FOPEN foliage penetration, murs, ...) basse fréquence ou autre fréquence, ULB ou non doivent être approfondis.

Les techniques de retournement temporel appliquées aux ondes sonores, ultrasonores et électromagnétiques ouvrent également de nouvelles perspectives à la détection, localisation, identification de cibles passives inconnues (applications à la protection de bâtiments, défense de zone, détection d'ennemis embusqués derrière un rideau d'arbres ...). Ce concept pourrait également être utilisé pour la destruction d'une source par amplification de l'onde, focalisée et compressée, puis réfléchi sur celle-ci.

Depuis quelques années, l'intérêt de la communauté radar pour les systèmes de détection et de localisation passive ne cesse de croître. Cet intérêt est principalement lié à l'attrait des basses fréquences (< à 1GHz), notamment pour leurs capacités d'antifurtivité ainsi que pour les opportunités offertes par la grande variété d'émetteurs existants. Ces études méritent d'être approfondies.

Les problèmes inverses pour l'imagerie sont typiquement duaux car ils prennent leur origine dans des applications telles que l'évaluation non destructive de structures de matériaux, l'ingénierie biomédicale, la caractérisation de l'environnement (prospection pétrolière, détection d'objets enfouis ou immergés), ainsi que la caractérisation des émissions électromagnétique ou acoustique. Au demeurant ces problèmes restent complexes et nécessitent de disposer de sources et capteurs optimisés, ainsi que de moyens de modélisation et de simulation de ces phénomènes, et du traitement du signal associé.

#### **Furtivité**

L'axe principal de recherche demeure la furtivité active, notamment avec l'emploi de nouveaux matériaux. L'utilisation des plasmas dans l'air pour réduire la contribution à la SER de certains

points brillants, et les plasmas confinés dans une enceinte (radôme) destinés à masquer les antennes, semblent également prometteurs.

#### **4 > Agressions électromagnétiques (et protections)**

Les études menées depuis une dizaine d'années sur les Micro-ondes de fortes puissances ont conduit à un élargissement significatif du spectre des menaces. Globalisé sous le vocable anglo-saxon IEMI (Intentional Electromagnetic Interference), ce terme couvre toutes les agressions électromagnétiques intentionnelles allant du plus fort niveau à des menaces « cibles dédiées » de plus faible niveau. Les besoins se situent donc à la fois sur les sources génératrices de très fortes puissances dans un encombrement réduit (commutation haute tension ultra rapide, agilité des paramètres, antennes fortes puissances large bande.. cf. §1) et les protections à apporter sur les systèmes (accès front door – têtes hyperfréquences, LNA, LNB- composants électroniques...).

Des études devront être menées sur les limiteurs hyperfréquences à faible perte d'insertion, les protections des circuits électroniques par diodes ou filtres ainsi que des solutions de protection dites « intelligentes » (logicielles, circonvolution...). En terme de menace potentielle, un effort particulier concernera la génération volontaire du chaos dans les circuits électroniques et son corollaire, la protection vis-à-vis du chaos.

#### **5 > Simulation / modélisation**

C'est un des axes principaux de ce domaine, nécessaire pour prévoir les caractéristiques de la propagation et de la diffraction des rayonnements. En effet, si la communauté scientifique est bien placée sur le terrain des méthodes classiques (intégrales, éléments finis, différences finies, FDTD...), un effort doit accompagner le développement de méthodes hybrides (multi-échelles, multi-physiques – e.g. : électromagnétique, thermique, mécanique), méthodes rapides (Fast multipole method) ou stochastique (type CRBM ou power balance). Les efforts devront prendre en considération les géométries complexes multi-échelles, l'anisotropie des matériaux, ainsi que leur caractère dispersif et non linéaire.

#### **6 > Compatibilité électromagnétique**

La compatibilité électromagnétique couvre 3 grands domaines d'activité :

- la compatibilité entre équipements,
- la compatibilité avec l'environnement,
- la compatibilité entre systèmes.

La CRE (compatibilité radioélectrique entre émetteurs/ récepteurs) est un cas particulier, qui reste un problème encore mal abordé et mal résolu, notamment à bord des navires. Ces problèmes sont actuellement traités de manière empirique "a posteriori" pour les systèmes radioélectriques qui sont de plus en plus large bande. Les travaux de modélisation et de simulation devront être particulièrement améliorés (Cf. §5) dans ces domaines pour pouvoir répondre plus efficacement à des problèmes de plus en plus courant (compte tenu de la prolifération des sources radioélectriques et de la puissance des émetteurs) et rarement pris en compte en amont de l'élaboration d'un projet : l'objectif est de prendre en compte la CEM dès la phase de conception des systèmes. Ces problèmes, typiquement duaux, pourront profiter des avancées technologiques du monde civil.

#### **7 > Ondes et biologie**

Pour la défense, les problèmes de couplage ondes- structures biologiques concernent principalement les armes à énergie dirigée et plus précisément les armes électromagnétiques ou micro-ondes de forte puissance. Pour cela, il sera nécessaire de mener des études destinées à évaluer le niveau de létalité (pour les utilisateurs – ou éventuellement cibles humaines) de ces armes dites non létales.

Les études ont beaucoup porté sur la quantification des puissances absorbées par les tissus ; dans le contexte d'armes MFP, dont la durée des impulsions, ne dépassent pas quelques microsecondes,

il sera nécessaire de renforcer les études axées sur la « micro dosimétrie », les effets athermiques et l'analyse des interactions au niveau cellulaire.

## **DOMAINES D' ACTIONS PRIORITAIRES**

### **Développement et applications des techniques de retournement temporel électromagnétique**

Ces techniques, largement utilisées en acoustique, apparaissent depuis 2 ou 3 ans dans la communauté électromagnétique ; leurs applications, qui semblent prometteuses et diversifiées, ouvrent de nombreuses perspectives susceptibles d'intéresser la défense :

- **Communications discrètes** : en présence de plusieurs sources, chacune possède son canal de communication indépendant avec l'antenne. Plus l'environnement est complexe, plus le dispositif est efficace et discret.
- **Armes électromagnétiques** : capacité de localisation d'une cible dans un environnement complexe (diffusant, réverbérant...) et de focalisation d'une onde sur cette cible avec la possibilité de destruction ou d'endommagement par amplification spatio-temporelle de l'onde (focalisation et compression du signal).
- **Détection/ localisation identification d'intrus ou de cibles dans un milieu complexe** : protection de bâtiments, défense de zone, détection d'hélicoptères embusqués derrière un rideau d'arbres, classification de cibles, anti-furtivité. L'écho renvoyé par la cible dans l'environnement complexe est perçu comme un bruit, que l'on exploite pour localiser et identifier la cible avec une haute précision.

Un projet <sup>(20)</sup> s'articulant autour de ces trois axes sera lancé à l'automne 2006, reposant essentiellement sur la mise au point d'un « kaléidoscope » électromagnétique destiné à focaliser, par retournement temporel, une onde sur une cible. Un démonstrateur devrait être réalisé sur une durée de trois ans. Les autres applications (communications et détection) seront soutenues dans le cadre de projets REI.

### **La vulnérabilité et la protection des systèmes aux armes électromagnétiques**

L'axe essentiel des recherches consiste en la compréhension des phénomènes physique d'interaction, sources de perturbation électromagnétiques des fonctions électroniques des systèmes, en fonction des paramètres des agressions. L'objectif est d'identifier les critères les plus pertinents pour perturber un système (détournement d'un missile par exemple) et, de façon complémentaire, de savoir comment se protéger d'une telle agression. Le projet Vulcaim (vulnérabilité des cartes imprimées), destiné à fournir des modèles comportementaux de la susceptibilité des systèmes à différents niveaux d'interaction, devrait démarrer à l'automne 2006. Il constituera le socle du projet « Vésuve » qui inclura la prise en compte des aspects multi-échelles (méthode de KRON, topologie, approches stochastique et statistique), ainsi que la vulnérabilité des entrées dites « front door » des émetteurs- récepteurs (LNA, LNB ..). Ce projet, de grande envergure, devrait s'étendre sur cinq ans ; il sera associé aux PEA AGREMI et VULNE 2 qui, eux, traiteront des systèmes complets.

### **L'évaluation de la non-létalité des armes électromagnétiques**

L'emploi probable, à moyen/ long termes, d'armes électromagnétiques ou de radars pulsés ultra large bande, nécessitera de démontrer la non létalité ou la létalité réduite ou encore la létalité maîtrisée, de ces systèmes ; ceci passe par l'analyse des effets « nanoscopiques » à l'échelle de la cellule et à l'interprétation des limites des effets d'électroporation qui pourraient s'avérer rédhibitoire pour certaines cellules. A l'inverse, utilisées à plus hautes fréquences (autour de 94 GHz), les ondes électromagnétiques pourraient, par « effet de peau », entraîner des sensations de picotement, voire de légère brûlure, sur la peau des individus, dont les applications (en expérimentation actuellement aux USA) seraient la dispersion de foules agressives. Ce thème sera traité au sein du projet BIOEM (bio électromagnétisme) qui sera lancé fin 2006. Une collaboration est envisagée avec les USA dans le cadre des études soutenues sur ce thème par l'AFOSR <sup>(21)</sup>. Ce projet d'une durée initiale de deux ans pourrait, compte tenu de la complexité du sujet, donner suite à un PEA. ■

<sup>(20)</sup> AORTE : Amplification d'Ondes par Retournement Temporel Electromagnétique

<sup>(21)</sup> Air Force Office for Scientific Research

# Domaine 4

## ELECTRONIQUE

### Périmètre :

- Nanotechnologies appliquées à l'électronique
- Micro et Nano Systèmes Electro Mécaniques
- Micro sources d'énergie, conversion, transmission et stockage
- Composants et circuits haute fréquence
- Matériaux et substrats
- Technologies et procédés de fabrication, d'hybridation et d'intégration
- Packaging, fiabilité, obsolescence
- Conception, modélisation

Pôles d'expertise DGA concernés : ASC, SSI, TEC, MC, SdS, ASA, ASN, AST, MAN, CGN +pôle Essais

### PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES ET INTERET DEFENSE

L'électronique est un domaine où la part des applications militaires reste très négligeable par rapport à l'ensemble des marchés civils et où les activités industrielles sont, en terme de développement technologique, extrêmement organisées au niveau mondial.

Dans le domaine défense, les composants électroniques sont des constituants clés de l'ensemble des systèmes d'armes, car leur performance détermine pour une grande part la performance des systèmes. La vigilance et l'anticipation scientifique et technologique apparaissent dans ce contexte essentielles.

Les besoins de la défense en matière de R&T de base concernent en particulier les problématiques suivantes :

- Guerre électronique et détection : convertisseurs analogiques numériques et numériques analogiques, composants et circuits innovants pour le traitement des signaux hyperfréquences, oscillateurs à haute pureté, résonateurs, circuit mélangeur hyperfréquence, capteur, commutateur, limiteur de puissance, composants de puissance, etc....
- Guidage et navigation : accéléromètre et gyromètre vibrants.
- Protection du fantassin : capteurs communicants et sources d'énergie embarquées, détection des menaces NRBC, reconnaissance et identification.

Au delà de l'augmentation des performances, les composants et les systèmes développés pour répondre aux besoins défense doivent être bas coût, peu sensibles aux radiations, suffisamment intégrés pour permettre une réduction significative de l'encombrement, capables de fonctionner avec fiabilité dans des environnements sévères.

Pour répondre à ces besoins, il est important de suivre l'émergence de ces technologies et de détecter, dans la mesure du possible, celles pouvant amener des ruptures technologiques, afin d'en accélérer le développement. Le type de soutien DGA pour ces technologies, dont certaines sont embryonnaires, est à déterminer au cas par cas. Il prend au minimum la forme d'une veille scientifique.

Les thèmes scientifiques identifiés sont les suivants :

- les nanosciences et nanotechnologies et de façon générale, toute nanotechnologie permettant une évolution du domaine électronique (nanotubes de carbone, la spintronique, etc...). Les bénéfices attendus pour la Défense concernent à moyen ou long terme la rapidité, la capacité et la compacité des calculateurs, en particulier embarqués, et les dispositifs de détection et leur électronique associée,

- les Micro et Nano Systèmes Micro Mécaniques, en particulier pour des fonctions de guidage et navigation, mais aussi en sécurisation des dispositifs de mise à feu, dans le traitement des signaux hyperfréquences et en identification des menaces NRBC,
- les micro-sources d'énergie pour applications embarquées : génération, mais aussi conversion et stockage, pour lesquels les besoins Défense sont clairement établis : micro-drones, capteurs et capteurs abandonnés, MEMS RF, appareils portables, sources d'énergie pour le fantassin,
- les nouveaux composants et circuits hyperfréquence pour des applications en guerre électronique, détection, leurrage, réseau d'antennes, émission, réception et traitement de signaux hyperfréquence,
- les nouveaux matériaux et les nouveaux substrats indispensables pour développer les nouveaux composants et circuits hyperfréquences.

## ORIENTATIONS SCIENTIFIQUES

### 1 > Nanoélectronique

Depuis plusieurs décennies les industriels des semi-conducteurs se sont organisés au niveau mondial et ont établi une feuille de route qui décrit les événements technologiques nécessaires pour satisfaire l'évolution attendue des fonctions et des produits. Cette feuille de route s'appuie sur une approche de type top down qui vise à favoriser l'accroissement des performances et la réduction des coûts par la réduction de la taille des composants et l'augmentation de la densité d'intégration des transistors. Les principales directions de recherche de cette approche sont le développement des techniques de lithographie, l'élaboration des composants CMOS ultimes (composants aux dimensions déca-nanométriques) et l'étude de l'ensemble des phénomènes liés à l'ultra miniaturisation (Effets quantiques, transport balistique, fluctuation de paramètres à l'échelle atomique, phénomènes de transport non-stationnaires). Etant au cœur de la feuille de route industrielle, cette approche est fortement soutenue par la recherche civile, industrielle ou académique. Compte tenu du niveau d'investissement nécessaire pour orienter un développement spécifique, les activités DGA dans ce domaine se limitent à une veille scientifique.

La nanoélectronique s'appuie également sur une approche de type bottom-up où, à l'inverse, il s'agit d'utiliser des techniques de manipulations des atomes ou de molécules ou des techniques d'auto-assemblage pour élaborer et reproduire des fonctions électroniques. Ces technologies devraient être disponibles d'ici 10 à 15 ans. L'approche bottom-up est donc susceptible de ruptures. Les sujets présentant un intérêt pour la défense couvrent entre autres :

- la spintronique (ou électronique de Spin) qui consiste à utiliser des courants électriques polarisés en spin avec en particulier l'exploitation des jonctions tunnel magnétiques pour l'élaboration d'oscillateurs hyperfréquence accordable,
- l'électronique moléculaire, avec le greffage moléculaire sur Silicium ainsi que l'étude des technologies d'intégration de polymères organiques dans des dispositifs électroniques,
- la bioélectronique (étude de certaines protéines permettant de réaliser des dispositifs nanoélectroniques au temps de réponse ultracourt),
- les nanofils semi-conducteurs avec des diamètres de l'ordre de 5 nm, parfois associés aux nanotubes de carbone, font l'objet d'attention croissante pour la réalisation de dispositifs à base de III-V ou de IV-IV,
- la réalisation et l'étude des propriétés électroniques des chaînes de nanoparticules semiconductrices.

### 2 > Micro et Nano Systèmes Electro-Mécaniques M(N)EMS

Les méthodes de fabrication collective de la microélectronique sont utilisées pour miniaturiser des objets ou intégrer des fonctions complexes. Les micro ou nano objets obtenus (M[N]EMS) sont en particulier capables d'intégrer plusieurs technologies différentes (par exemple des capteurs physiques, chimiques et biologiques associés à un dispositif de traitement du signal). Les domaines d'application présentant un intérêt défense sont assez vastes. Il s'agit de :

- MEMS RF (commutateurs, résonateurs, limiteurs de puissance) qui par leur principe de fonctionnement peuvent permettre de combiner les avantages des composants mécaniques (linéarité, faibles pertes, faible consommation) et des composants électroniques intégrés (miniaturisation, rapidité) ;
- MEMS inertiel pour des applications en guidage et navigation (accéléromètre, gyromètre, etc....) ;
- BIO-MEMS appliqués en particulier à la détection d'agents biologiques et à la microfluidique pour permettre des diagnostics sur puce ;
- utilisation des M(N)EMS pour des applications aussi diverses que les dispositifs sécurisés de mise à feu des munitions, le contrôle de trajectoires des satellites par des micropropulseurs (domaine des PYRO-MEMS), des micro-actionneurs pour le contrôle d'écoulement fluide (domaine des AERO-MEMS) ou de l'élaboration de micro-sources d'énergie (POWER-MEMS), etc.

Enfin, quelque soit leur application, la fiabilité des MEMS reste un obstacle à surmonter.

### **3 > Micro source, conversion, transmission et stockage d'énergie**

Cette thématique, développée dans le domaine interdisciplinaire de l'énergie, répond à des besoins opérationnels en mobilité et en autonomie. De plus le développement de capteurs et de mini ou micro drones s'accompagne de nouveaux besoins spécifiques Défense en micro-sources d'énergie performantes et compactes. Dans ce contexte, il est intéressant de suivre les développements technologiques de l'ensemble des domaines concernés, c'est à dire :

- Les micro-batteries et les micro-piles à combustible
- Les micro-générateurs thermoélectriques, magnétique, les cellules photovoltaïques et autres technologies de récupération d'énergie
- Les dispositifs innovants de transmission d'énergie
- Le potentiel des Nanotubes de Carbone pour la conversion d'énergie

### **4 > Composants et circuits haute fréquence**

La montée en fréquence des circuits monolithiques de la filière silicium constitue un axe majeur dans le domaine des radiofréquences et des hyperfréquences. Par contre, pour les fréquences millimétriques, le développement des filières III-V (GaAs et InP) est nécessaire pour définir de nouveaux systèmes d'émission / réception. Pour l'évolution de leur architecture et l'optimisation de leurs performances, la prise en compte des techniques nouvelles de traitement du signal et des conditions de propagation est indispensable. Ainsi, les recherches prioritaires doivent concerner :

- l'optimisation des performances des amplificateurs de puissance à très haute linéarité intégrés dans des systèmes utilisant des modulations complexes ;
- le traitement des signaux hyperfréquences par technologies optiques ;
- l'optimisation de l'intégration monolithique des dispositifs, avec pour orientation principale l'amélioration :
  - des commutateurs à faibles pertes et grande isolation ;
  - des filtres à haute sélectivité et accordables ;
  - des oscillateurs à faible bruit de phase ;
  - des modulateurs et démodulateurs ;
  - des systèmes de traitement du signal par conversion duale ;
  - des antennes ou réseaux d'antennes multifonctions.

### **5 > Matériaux et substrats**

Le Silicium et l'Arséniure de Gallium en tant que matériaux pour les composants électroniques associés aux technologies de fabrication standard peuvent ne plus être en mesure de répondre

aux exigences de performances. D'autres systèmes de matériaux sont désormais à des stades de développement avancés grâce notamment aux progrès réalisés en hétéroépitaxie. Il s'agit :

- de composés à base de SiGe pour les matériaux IV-IV,
- de la filière GaN pour les composés III-N,
- des matériaux à base d'antimoine et des composés associés appelés aussi matériaux 6.1 (adaptation de maille au GaSb),
- du carbure de Silicium (SiC) qui grâce à ses performances haute température permet de réaliser des composants de puissance et de radiofréquence.

L'utilisation de substrat autre que le Silicium est également source d'amélioration de performance. Il s'agit essentiellement de réaliser des composants sur des couches minces de Silicium isolées du Silicium massif par une couche d'isolant : Silicon On Insulator pour l'électronique de basse consommation. Dans ce nouveau domaine du « Substrate Engineering », Il s'agit de suivre les développements technologiques qui concernent les couches contraintes ou alliages contraints sur isolant (sSOI : Strained Silicon on Insulator, sSiGeOI : strained Silicon-Germanium on Insulator).

En ce qui concerne les composés III-V, et en particulier le GaN, les conditions de préparation des substrats ou quasi-substrats permettant une homoépitaxie sont susceptibles d'améliorer les performances des composants de façon significative.

## **DOMAINE D'ACTION PRIORITAIRE : LES M(N)EMS**

Si l'ensemble des sujets mentionnés fera l'objet d'une veille scientifique, le domaine pluridisciplinaire des micro- et nanosystèmes électro-mécaniques sera le sujet d'actions prioritaires en 2006 – 2007. Le domaine des M(N)EMS est un domaine avec un potentiel d'applications Défense démontré et des capacités de rupture prometteuses pour les systèmes d'armes. L'ensemble des applications des MEMS sera concerné par ces actions, avec une attention particulière portée aux MEMS inertiels, aux MEMS RF et aux composants permettant l'élaboration de micro-sources d'énergie. Dans la perspective de fédérer les efforts de R&T, une journée thématique MEMS sera organisée au cours du dernier trimestre 2006 permettant de rassembler les acteurs académiques et industriels du domaine. ■

# Domaine 5

## OPTIQUE ET PHOTONIQUE

### Périmètre :

Le domaine Optique et photonique couvre les technologies relatives à l'utilisation de rayonnements électromagnétiques depuis les fréquences THz jusqu'aux rayons X :

- Sources, détecteurs, fibres optiques
- systèmes d'imagerie
- spectroscopie
- capteurs
- nanotechnologies

Pôles d'expertise concernés : CGN, ASC, ASA, ASN, AST, SSI, TEC, MAN, SHP, MC + Essais

### PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES ET INTERET DEFENSE

Les technologies optiques offrent des potentialités importantes pour les applications qui intéressent la DGA et sont associées à de nombreuses fonctions. De manière générale, les performances offertes par ces techniques leur confèrent un rôle privilégié dans le domaine de l'acquisition de l'information. Ainsi, la fonction observation occupe une place importante et les systèmes d'imagerie constituent une thématique centrale. L'intérêt défense s'exprime également pour d'autres applications. On peut citer par exemple l'utilisation des techniques de spectroscopie pour la détection NRBC ou la réalisation de senseurs inertiels de haute performance à base d'interféromètres à ondes de matière. En outre, les systèmes laser offrent un apport intéressant pour la neutralisation d'agressions au travers, par exemple, des systèmes de contre-mesure optronique ou, à plus long terme, des armes laser de haute énergie.

### ORIENTATIONS SCIENTIFIQUES

#### 1 > Sources

##### Lasers à semi-conducteurs

Les lasers semi-conducteurs offrent des propriétés exceptionnelles en terme de compacité, d'efficacité électrique-optique et de simplicité d'utilisation. Ils sont par ailleurs susceptibles d'offrir des réductions de coût significatives car ils sont compatibles avec des techniques de fabrication massivement parallèles. Les applications militaires ont donc tout à gagner des potentialités offertes par cette technologie.

Parmi les thématiques qui intéressent la défense, l'amélioration du rendement de conversion et de la brillance (spectrale et spatiale) des diodes laser de pompe constitue une source de progrès pour un grand nombre d'applications laser. On peut également citer l'amélioration des performances et l'extension de la gamme spectrale des lasers à cascade quantique, ou le développement de sources adaptées aux techniques de refroidissement et manipulation d'atomes par laser.

##### Lasers solides et à fibres

Pour les applications laser ne permettant pas l'utilisation directe de lasers semi-conducteurs (haute qualité de faisceau, longueurs d'onde spécifiques, impulsions courtes de forte énergie), l'évolution rapide des technologies laser solides et à fibre justifie une attention toute particulière. Ainsi, les lasers fibrés présentent des propriétés séduisantes pour certaines applications défense potentielles et des développements spécifiques sont en cours pour atteindre les niveaux de performance requis. Les techniques de combinaison, cohérente ou non, pour l'obtention des très

hautes puissances moyennes nécessaires aux armes laser de haute énergie constituent un sujet connexe. Enfin, l'utilisation de nouveaux matériaux comme les verres de chalcogénures dopés devrait permettre l'élargissement de la fenêtre spectrale.

En parallèle, d'autres approches sont considérées comme prometteuses par la défense pour faire progresser les performances des sources laser. Ainsi, plusieurs pistes sont à l'étude : les OPO pour la génération de rayonnement IR et UV, les céramiques laser pour la montée en puissance. Des approches comme les lasers à fibre monocristalline, les lasers athermiques ou les lasers à vapeurs d'alcalins semblent présenter également un potentiel intéressant qui doit être mieux compris.

### ***Transport de faisceaux laser***

Pour des applications laser soumises à des contraintes d'encombrement particulièrement sévères comme les systèmes de contremesure optronique ou d'imagerie active, le transport du faisceau, permettant le déport de la source dans un endroit favorable conduit à une simplification considérable de la problématique d'intégration. Dans ce domaine, les fibres, notamment microstructurées, présentent des caractéristiques qui peuvent être exploitées pour répondre à ce type de besoin. Parmi les objectifs à atteindre, on peut citer le développement de fibres à faibles pertes, à faibles nonlinéarités ou à coeur creux permettant le transport d'impulsions de forte puissance crête.

Pour des applications de type arme laser de haute énergie, les densités de puissance envisagées nécessitent l'utilisation d'optiques de grande dimension présentant d'excellentes tenues au flux lumineux. Dans cette perspective, l'enjeu pour la DGA consiste à étudier la problématique de la tenue au flux des matériaux et traitements, et développer des solutions appropriées.

## **2 > Détecteurs**

Le détecteur de lumière constitue un élément fondamental des systèmes d'imagerie et ses caractéristiques ont un impact direct sur la performance qui peut être atteinte au global. Il est donc essentiel pour la défense de maintenir un niveau d'activité élevé dans ce domaine afin de permettre aux forces armées de disposer de capacités accrues en matière d'observation. Plusieurs thématiques sont ainsi à promouvoir :

### ***Intensificateurs de lumière***

Malgré les bonnes performances de tubes intensificateurs de lumière actuels, la tendance actuelle dans ce secteur consiste à développer des technologies pouvant conduire à, d'une part des gains significatifs en matière de compacité, et d'autre part permettre une exploitation numérique des images de sortie. Un travail de réflexion est à mener pour comparer les potentialités des différentes filières, notamment les approches EBCMOS, MCPCMOS et les matrices de photodiodes à avalanche, pour définir une stratégie scientifique appropriée.

### ***Détecteurs à haut niveau de fonctionnalité***

Le développement des techniques de micro-lithographie ouvre la porte à la réalisation de circuits électroniques de plus en plus complexes. Ainsi, il est aujourd'hui possible d'intégrer au niveau du pixel une électronique permettant d'accroître de manière significative les fonctionnalités du plan focal détecteur : correction locale de défauts, de non-uniformité, implémentation d'algorithmes de traitement d'image pour, par exemple, le pistage d'objets d'intérêt. Ces techniques seront amenées à jouer un rôle essentiel, en particulier dans un contexte où la multiplication des capteurs est susceptible de conduire à une quantité de données absolument ingérable par les approches actuelles.

### ***Détecteurs infra-rouge***

De nombreuses idées sont à développer pour permettre de faire progresser la filière HgCdTe. On peut en particulier citer des travaux visant à contrôler le dopage P extrinsèque, essentiel pour la réalisation de structures P sur N. L'amélioration des techniques de gravure pour la réduction de la taille du pixel est un autre sujet d'intérêt, ainsi que la réalisation de détecteurs multispectraux. Enfin, la réalisation de structures matricielles de photodiodes à avalanche constitue un enjeu majeur pour des applications comme l'imagerie hyperspectrale ou l'imagerie active, pour lesquelles les flux reçus sont particulièrement faibles. Pour la dernière application citée, il est en outre nécessaire de développer des détecteurs présentant une résolution temporelle suffisante pour obtenir une sélectivité en distance sur la scène observée.

Au niveau des détecteurs IR non-refroidis, les travaux seront centrés sur le développement de la filière silicium amorphe et on cherchera à réduire le pas de pixels pour arriver à terme à des matrices de microbolomètres au format TV ou mieux, tout en maintenant les performances en NETD.

Etant donné l'importance de cette thématique pour les applications militaires, il convient de signaler l'intérêt de la DGA pour toute idée de rupture basée sur l'utilisation de nouveaux matériaux ou de nouveaux concepts, comme par exemple les super-réseaux ou les détecteurs à cascade quantique. Les nouvelles approches ou matériaux pour la détection des rayonnements aux très courtes longueurs d'onde (UV, X et  $\gamma$ ) figurent également parmi les thématiques à suivre.

### **3 > Systèmes laser**

#### **Utilisation des impulsions femtoseconde**

Les performances offertes par les lasers femtoseconde en terme de puissance crête ouvrent l'accès à une région de l'espace des paramètres qui pourrait offrir des potentialités importantes. L'objectif de la DGA consiste maintenant à évaluer le potentiel et les avantages compétitifs de la technologie pour des concepts d'emploi comme la contre-mesure, l'imagerie active hyperspectrale ou la détection NRBC. Pour répondre à cette question, il est nécessaire de poursuivre les travaux sur les phénomènes de propagation d'une impulsion femtoseconde dans l'atmosphère, sur les interactions laser matière, et approfondir notre compréhension de cette approche pour la détection NRBC (LIDAR, LIBS). Des conclusions doivent également être apportées quant à la possibilité de guider une décharge électrique ou une impulsion électromagnétique le long d'un filament femtoseconde.

Il faut également citer l'intérêt des sources femtoseconde pour la génération secondaire de rayons durs qui pourraient permettre le développement de techniques comme l'imagerie gamma.

#### **Nouveaux concepts de gyromètres optiques**

Parmi les idées qui intéressent la DGA, on retient le développement de gyrolasers à base de lasers solides ou semiconducteurs qui permettraient de s'affranchir des contraintes imposées par les systèmes actuels reposant sur l'utilisation de lasers à gaz, et conduire à des réductions de coût importantes.

#### **Techniques actives d'identification**

L'utilisation des lasers présente également un potentiel important pour l'identification de cibles. Ainsi les techniques d'imagerie active (2D, 3D, LADAR bifréquence ...) constituent un thème d'intérêt majeur pour la DGA. Un travail important reste toutefois à fournir pour évaluer les performances accessibles avec ce type de système, ainsi que pour développer les composants appropriés. D'autres concepts comme la profilométrie ou la vibrométrie méritent également un examen attentif et leur apport sur le plan opérationnel doit être clairement identifié.

#### **Calcul et communication quantiques**

Les progrès réalisés en cryptographie quantique ont permis d'atteindre des niveaux de performance intéressants. L'apport de ces technologies par rapport aux approches classiques fait actuellement l'objet d'une réflexion approfondie.

L'ordinateur quantique suscite un intérêt incontestable de la DGA, malgré le caractère très prospectif des études associées. Une veille scientifique est menée sur le sujet et des soutiens ponctuels pour certaines actions susceptibles de faire progresser la technologie de manière significative peuvent être envisagés.

### **4 > Techniques pour l'imagerie**

Sous cette étiquette, sont rassemblées toutes les techniques relatives à la formation des images. Les sujets d'intérêt pour la défense y sont nombreux.

#### **Matériaux optiques**

Des attentes importantes reposent sur la mise au point de nouveaux matériaux optiques, comme les vitrocéramiques IR, susceptibles d'offrir un potentiel de réduction de coûts important. Par

ailleurs, l'utilisation de métamatériaux (micro/nanostructures métalliques ou diélectriques) et notamment la réalisation de superlentilles permettant d'atteindre des résolutions meilleures que la limite de diffraction, sont considérées comme des approches séduisantes pour les applications de défense. Les perspectives d'application restent toutefois encore très éloignées et un travail important est à mener sur le plan fondamental pour extraire tout le potentiel de ces concepts.

### **Technologies hyperspectrales**

Le principe de cette technologie consiste à exploiter les caractéristiques spectrales d'une image afin d'en extraire un maximum d'informations et conduire à l'identification d'un objet d'intérêt dans une scène complexe. Le travail à fournir pour identifier le potentiel de cette technologie et l'amener à maturité est important. L'avenir sera consacré à la construction de bases de données pour identifier l'information disponible et déterminer des signatures caractéristiques, aux développements d'algorithmes pour le traitement des images hyperspectrales. Enfin, des études seront menées sur les architectures de systèmes d'imagerie hyperspectrale passive et active, et les composants associés.

### **Techniques d'imagerie très haute résolution et de correction du front d'onde**

On traite ici des techniques d'imagerie permettant d'atteindre de très hautes résolutions angulaires (inférieures à quelques mrad) en présence ou non de turbulences atmosphériques, à savoir l'optique adaptative et la synthèse d'ouverture. L'optique adaptative devrait permettre d'améliorer de manière significative la résolution des moyens d'observation militaires, notamment terrestres, qui souffrent rapidement de la turbulence. Un enjeu important consiste à étendre le champ d'isoplanétisme de ces dispositifs et l'utilisation de techniques multi-conjuguées offre une réponse intéressante à ce problème. A plus long terme, la synthèse d'ouverture devrait offrir un gain en résolution très significatif et ainsi permettre la réalisation de certaines fonctions jusqu'alors impensables comme l'observation de la Terre avec une résolution métrique depuis une orbite géostationnaire. La DGA cherchera donc à mieux cerner le potentiel de l'optique adaptative multi-conjuguée, développer les techniques de synthèse d'ouverture, ou favoriser la mise au point de nouveaux composants pour l'optique adaptative.

### **Protection de l'observation**

Ce thème fait référence aux techniques de protection des systèmes d'imagerie (l'œil nu y compris) face à des agressions lasers continues ou impulsives. Dans ce domaine, un intérêt particulier sera apporté à l'étude de la limitation optique notamment dans le visible et l'infrarouge. Toute idée pouvant favoriser le développement d'un interrupteur optique rapide et grand champ est également susceptible d'intéresser la défense. Des travaux sont également à conduire au niveau du durcissement des détecteurs et de la réduction de la SEL des systèmes d'observation, que ce soit par des travaux au niveau du détecteur ou du système optique.

## ***5 > Manipulation d'atomes par laser***

### **Horloges atomiques**

Des perspectives intéressantes se dessinent dans l'utilisation de vapeurs d'alcalins pour la définition de références temps-fréquence, qui pourront être utilisées dans nos systèmes de radio-navigation ou pour la synchronisation de systèmes d'information et de commandement. Les techniques basées sur le piégeage cohérent de population dans un gaz de Rubidium ou de Césium sont ainsi susceptibles de conduire à des dispositifs miniatures présentant un niveau de performance acceptable pour certains besoins militaires. Ce sujet semble maintenant présenter un niveau de maturité suffisant pour envisager le passage au stade du démonstrateur technologique. L'utilisation d'atomes froids permettra de gagner plusieurs ordres de grandeur en stabilité et, dans ce domaine, la DGA aura pour objectif de développer des approches à base de puce atomique pouvant conduire à d'excellentes stabilités tout en s'affranchissant de l'utilisation de cavités micro-ondes qui limitent la compacité de ce type de dispositifs.

### **Interféromètres atomiques**

L'interférométrie à ondes de matière est considérée comme une approche pleine de promesses pour les senseurs inertiels de haute précision. On s'attend ainsi à ce que ces techniques permettent d'aboutir à moyen terme à des gyromètres et gravimètres embarquables de haute précision. Un travail important reste toutefois à fournir pour étudier de nouveaux concepts, continuer à faire

progresser les performances accessibles tout en étudiant les limites fondamentales de la technologie. La DGA s'attachera également à étudier les pistes permettant d'aboutir à des niveaux de compacité compatibles des contraintes d'intégration militaires.

## DOMAINE D'ACTION PRIORITAIRE : LES TECHNOLOGIES TERAHERTZ

Le rayonnement THz bénéficie d'un certain nombre de propriétés qui pourraient conduire à la mise au point de systèmes particulièrement innovants dans le domaine de la défense et de la sécurité. Il semble par exemple possible d'utiliser des techniques d'imagerie spectrale THz pour détecter des explosifs camouflés sous des vêtements ou enfouis dans des bagages. De nombreuses questions se posent toutefois sur le potentiel de ces technologies en raison notamment de la mauvaise transmission atmosphérique dans cette fenêtre spectrale.

Pour répondre à ces questions, la DGA a lancé plusieurs actions visant à évaluer le potentiel des technologies THz pour les applications de défense et sécurité. Ce programme s'articule autour des 3 axes suivants :

- *Etude fondamentale de l'interaction entre le rayonnement THz et la matière*  
 Cette étude comporte 2 volets principaux. Il s'agit d'une part de construire une base de données rassemblant les signatures spectrales de différents types d'explosifs et d'agents biochimiques ; d'autre part de caractériser la propagation des ondes THz au travers de différents matériaux (vêtements, bois, plastiques, matériaux de construction...)
- *Etude de composants clés pour les systèmes THz*  
 La DGA cherche ici à développer les technologies permettant de faire progresser les performances des sources et des détecteurs THz.
- *Etude système*  
 Une réflexion théorique sera menée au niveau système pour évaluer les performances et les caractéristiques d'un système d'imagerie THz, ainsi que d'un système de détection d'agents biochimiques.

Ce programme, initié en 2006, s'étalera sur une durée de 3 ans, avec un point de rendez-vous organisé tous les ans. Des conclusions intermédiaires sont attendues à T0 + 2 ans afin de statuer sur l'intérêt de ces techniques pour les applications visées et définir les axes de développement à mettre en place à la suite. Un bilan des activités conduites, des résultats obtenus et des conclusions sera présenté au terme des 3 années. ■

	T0	T0 + 12	T0 + 24	T0 + 36
<b>Interaction matière-ondes THz</b>				
Construction base de données signatures spectrales agents biochimiques				
Construction base de données signatures spectrales explosifs				
Etudes propagation rayonnement THz				
<b>Composants THz</b>				
Laser à cascade quantique haute température de fonctionnement				
Photomélangeurs, photocommutateurs, antennes				
Métamatériaux THz				
Détecteurs THz haute sensibilité				
<b>Composants THz</b>				
Imageur THz				
Système détection NRBC				

# Domaine 6

## MATERIAUX ET CHIMIE

### Périmètre :

- Matériaux composites, organiques, métalliques et céramiques pour les structures, les protections et la pénétration
- Matériaux composites, céramiques ou métalliques, à matrice céramique, superalliages, pour applications thermostructurales et réfractaires
- Matériaux passifs et intelligents, à propriétés électriques, électromagnétiques, optiques, thermo-optiques, piézoélectriques, acoustiques, pour applications fonctionnelles avancées
- Matériaux de revêtements éco-compatibles, bio-procédés, traitements X-catalytiques pour la protection chimique, biochimique, la décontamination et la dépollution, et les applications anticorrosion
- Surfaces et interfaces fonctionnalisées, structurations superficielles pour la détection physico-chimique et les applications de la physique du contact solide et liquide
- Matériaux énergétiques pour la propulsion (ergols, propergols solides et liquides), la détonique (composés pyrotechniques) et le génie énergétique (matériaux de stockage et de restitution)
- Méthodes de calcul et de dimensionnement, modélisation et simulation des procédés et des comportements, rhéologie
- Concepts émergents transversaux : nanomatériaux, biomimétisme, biomatériaux, ...
- Matériaux alternatifs et procédés pour le respect de l'environnement et de la santé.

Pôles d'expertise DGA concernés : MC, ASA, ASN, AST, CGN, MAN, SHP

Tous les objets qui nous entourent sont constitués de matériaux, les caractéristiques fonctionnelles des premiers étant bien souvent liées aux particularités des seconds. L'influence des matériaux et des processus physico-chimiques dans les applications défense est ainsi très importante, et ce domaine impacte la totalité des systèmes d'armes. De plus, les spécificités d'emploi final des matériaux dans le secteur défense nécessitent souvent des performances bien supérieures à celles des besoins civils, et leur développement est presque toujours tributaire de la levée de verrous technologiques majeurs.

### PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES ET INTERET DEFENSE

Dans ce contexte, les orientations scientifiques du domaine visent à induire l'ensemble des ruptures et progrès technologiques décisifs permettant de décliner à terme des solutions matériau (incluant le processus industriel et le traitement en fin de service) toujours plus performantes vis à vis des besoins défense, c'est à dire à rechercher et dégager les thèmes novateurs et dimensionnant vis à vis des comportements génériques à assurer, en particulier :

- la résistance aux efforts et agressions de type mécanique, thermique, chimique, physico-chimique...
- les comportements fonctionnels destinés à améliorer l'intégration des matériaux, leurs propriétés électromagnétiques, leur efficacité énergétique, pyrotechnique...
- leur éco-compatibilité en toutes circonstances, et le respect des réglementations en vigueur.

Dans ce domaine foisonnant, de nombreux concepts nouveaux apparaissent : l'accès aux dimensions nanométriques oblige à reconsidérer la matière et ses modèles sous toutes les échelles, tandis que les matériaux deviennent eux-mêmes des métasystèmes intégrant des aspects pluridisciplinaires affirmés (chimie/optique, mécanique/électromagnétisme, thermique/mécanique...). Ces derniers aspects seront abordés en fin de chapitre de façon non exhaustive, ouvrant le domaine à de nombreux et potentiels enrichissements.

## **ORIENTATIONS SCIENTIFIQUES**

### **1 > Comportement face aux sollicitations mécaniques et aux efforts**

Cette première classe recèle les matériaux résistants à l'effort mécanique sous toutes ses formes (statique et dynamique, instantané ou cyclique). Une première thématique s'adresse aux applications de protections (blindage), mais également aux pénétrateurs. Elle couple les problématiques d'absorption d'énergie mécanique et de restitution d'énergie cinétique. Elle fait largement appel aux propriétés des métaux (et notamment des métaux denses), mais on relève dès à présent des solutions hybrides, ou utilisatrices de composés plus légers. Une deuxième thématique vise à améliorer les aspects "structures". Elle est sous tendue par l'association de la rigidité, de l'endurance et de la légèreté et s'adresse aux grands ensembles métalliques ou composites (coques marines et/ou sous-marines, aéronefs).

Les principales orientations scientifiques abordent pour les aspects protection/frappe :

- les matériaux à grains ultrafins et nouveaux alliages à haute résilience, les verres métalliques,
- les morphologies ou microstructures (microbilles, nidas, ...) amortissantes,
- les nouveaux procédés d'obtention de matériaux complexes (SPS, ...), nanostructurés,
- la modélisation de l'impact, la simulation des effets dynamiques (éclats, fragmentation) par méthodes multi-échelles notamment, orientations à consolider par une approche pluridisciplinaire dans le cas de la vulnérabilité des matériaux énergétiques (Cf. sous domaine 6).

Les principales orientations pour les aspects "structures" couvrent :

- les nouveaux constituants de matériaux composites organiques (nouvelles résines thermoplastiques ou thermodurcissables, fibres hautes performances), leur modélisation et leur mise en œuvre dans des technologies encore en développement (RTM),
- les nouveaux alliages légers, les alliages métalliques complexes (mailles cristallines géantes),
- les alliages très haute résistance.

De plus, ces orientations ne peuvent ignorer l'amélioration des outils de fiabilité ou de dimensionnement par des approches de co-conception intégrée matériaux/structures, ainsi qu'une meilleure compréhension de la nocivité des défauts et leurs conséquences en service, l'ensemble conduisant à une meilleure estimation du potentiel restant.

### **2 > Comportement thermique et thermomécanique en milieu extrême**

Cette classe de matériaux concerne les composés soumis à des contraintes thermiques sévères. La tenue en température s'accompagne souvent de la persistance d'autres caractéristiques (mécaniques, radiatives, thermocinétiques, électriques, ...) ce qui confère à ces matériaux (dits "thermostructuraux") une importance accrue dans le domaine de la défense. Les matériaux et constituants concernés par ces contraintes extrêmes se trouvent essentiellement dans les motorisations (aubes, carters), les parois de tuyères, et plus généralement sur les surfaces exposées à l'échauffement (pointes avant de missiles, échappements, etc.).

Les principales orientations visent à soutenir l'exploration :

- des céramiques nouvelles (oxydes ou non oxydes) pour barrières thermiques et les évolutions dans les procédés de dépôts associés,

- des superalliages et superréfractaires, les composés intermétalliques,
- des composites à matrice métallique et/ou céramique, à haute endurance à la fatigue thermomécanique, et les modes de cicatrization associés,
- de la modélisation et de la compréhension des transferts radiatifs et conductifs couplés à l'échelle élémentaire en liaison avec les effets thermomécaniques observés (ces outils sont mis également au service de la compréhension des mécanismes de vieillissement en service).

### **3 > Comportement à dominante fonctionnelle dans le domaine électromagnétique, optique, acoustique, piézo-électrique.... Matériaux et systèmes intelligents.**

L'interaction des matériaux avec les champs périodiques (électromagnétique et optique, acoustique...) est une thématique riche qui trouve de nombreuses applications sur l'ensemble du spectre des ondes et vibrations. Les concepts de production et de propagation des champs concernés, et les modèles associés, sont du ressort du domaine scientifique Ondes. Le domaine scientifique Matériaux et Chimie traite essentiellement des matériaux et métamatériaux aux comportements spécifiques recherchés vis à vis des champs (absorption ou réflexion, transmission des champs électriques ou vibratoires). Les applications visées sont celles de la furtivité, des fenêtres (IR, Radar, Sonar), mais aussi du contrôle de vibrations, ou de déformée, et des composés émergents pour les transducteurs.

Les orientations de recherche sur le domaine électromagnétique et optique comprennent :

- la recherche de composés diélectriques ou magnétiques à impédance artificielle géante (écrans, multicouches, métamatériaux), commandés, autoadaptatifs ou passifs,
- les systèmes à motifs structurés et périodiques à réflexion directionnelle sélective (BIP),
- les cristaux ou céramiques émergents pour fenêtres IR/radar hautes performances,
- les matériaux (non linéaires, nanostructurés, saturables inverses), destinés à la protection de la vision ou des capteurs.

Les thématiques de recherche sur les domaines acoustique et piézo-électrique sont orientées vers :

- les composites fortement amortissants pour masques et systèmes anéchoïques et les systèmes multicouches pour dômes,
- la synthèse de composés électroactifs piézoélectriques de haute efficacité,
- l'intégration de matériaux intelligents via des technologies actives ou semi actives pour le contrôle ou à la réduction d'écho.

### **4 > Comportement chimique et biochimique . Anticorrosion**

Les traitements chimiques et biochimiques jouent un rôle essentiel pour obtenir des propriétés spécifiques des matériaux dans leur environnement fonctionnel (en particulier en milieu marin), leur comportement en ce domaine étant aussi qualifié en termes d'éco-compatibilité (cette dernière problématique devient dimensionnante dans de nombreuses applications défense, et fait par ailleurs l'objet d'un Programme d'Etudes Amont à part entière).

Les thématiques concernées par ces comportements conduisent à étudier :

- les matériaux d'inhibition d'effets oxydo-réducteurs et hydro-polluants, notamment :
  - les revêtements avancés (protection contre la corrosion), compatibles notamment avec le milieu marin (antisalissures) et la réglementation sur la protection de l'environnement (suppression du chrome, limitation des composés organiques volatils),
  - les traitements de surface bioactifs (traitement de surface par bioprocédés),
- les matériaux et technologies de décontamination et de dépollution, notamment :
  - les matériaux pour traitements et décapages sans effluents et limitations des solvants chlorés et des CFC, en particulier les techniques de catalyse,
  - les matériaux pour complexation d'effluents pollués, pour le filtrage et la purification de l'air en ambiance confinée.

## 5 > Comportement des surfaces et interfaces - Fonctionnalisation superficielle

C'est d'abord par leur surface que s'exprime la réactivité chimique des corps. Ce thème est un focus du précédent sur les aspects spécifiques liés à la fonctionnalisation des surfaces et au greffage de molécules et aux composés pour les applications de détection et de piégeage réactif.

Sont concernés les thèmes abordant :

- les molécules et matériaux empreintes en vue de la détection d'espèces chimiques et biologiques,
- les traceurs surfaciques (chromophores, luminophores, X-réactifs).

Au delà de ces aspects, la surface des matériaux conditionne également une part importante de leur comportement vis à vis des interactions mécaniques, thermiques, électriques, avec le milieu extérieur. Les principales orientations dans ce domaine concernent aujourd'hui :

- les dépôts ou structurations fonctionnels superhydrophobes ou superhydrophiles (pour réduction / augmentation de traînée),
- les traitements de surfaces, la lubrification et la réduction des frottements solides.

Enfin, les interfaces jouent un rôle primordial dans le comportement des « méta »-matériaux et ensembles composites à propriétés optimisées. Cette thématique inclut donc également les progrès à réaliser dans le domaine des assemblages en général (collage, soudage...), de la compréhension de leurs propriétés et des outils de modélisation associés.

## 6 > Comportement thermodynamique et thermochimique. Génie énergétique

Ce thème est celui des matériaux énergétiques pour les explosifs (pyrotechniques) mais aussi pour la propulsion (propergols) tactique et stratégique : ils constituent le coeur des systèmes d'armes. En complément des orientations correspondantes du domaine 2, les principales orientations pour ces matériaux sont liées :

- à l'augmentation des performances des matériaux pour la propulsion (ergols), tout en garantissant les niveaux de sécurité requis,
- aux progrès à réaliser dans les carburants alternatifs, pétroles de synthèses et leurs catalyseurs, en vue de faire face à terme à la limitation des énergies fossiles issues du pétrole,
- à la recherche de procédés de stockage (matériaux hybrides organiques-inorganiques, hydrures) ou de synthèse dédiés à la filière hydrogène,
- à la prévision et aux contrôles des phénomènes d'instabilités dans les mélanges réactifs sous choc, afin de mieux maîtriser, diversifier et sécuriser l'utilisation de ces systèmes (application aux concepts de matériaux énergétiques à risques atténués – MURAT).

Font également partie de ce sous domaine par extension les matériaux pour le génie énergétique (électrique, chimique, thermique) et notamment :

- les matériaux pour la transformation directe d'énergie (thermoélectriques, photoélectriques...),
- les matériaux pour le stockage électrochimique (condensateurs, batteries, supercondensateurs, nouvelles électrodes) et pour l'amélioration du fonctionnement et de la miniaturisation des piles à combustible (électrolyte polymère, membranes céramiques, ...)

## ASPECTS TRANSVERSES ET PLURIDISCIPLINAIRES

Présents dans tous les systèmes, les matériaux et processus physico-chimiques font également l'objet de nombreux parcours pluridisciplinaires. Les matériaux à fonctions spécifiques (furtivité, bio-détection, décontamination, protection ...), mais également les matériaux structuraux, mettent ainsi en jeu plusieurs domaines simultanément. Les interactions pluridisciplinaires majeures ont lieu notamment avec :

- le domaine Mécanique des fluides et des solides pour tous les aspects modèles (de structure, de rupture, de comportement), l'interaction avec les écoulements, la combustion, les effets de surface,

- les domaines Ondes et Optique pour les aspects d'interaction avec tous types d'ondes (électromagnétiques, optiques, acoustiques), les métamatériaux, les matériaux pour la discrétion, pour la protection de la vision et des capteurs, pour la compatibilité électromagnétique,
- le domaine Electronique pour les aspects de substrats, d'intégration, de gestion thermique, ainsi que pour les aspects liés aux nanostructures,
- le domaine Biologie, via les aspects bio-chimiques liés à la décontamination et aux matériaux "empreintes", mais également aux bio-matériaux (matériaux bio-compatibles) sans oublier les approches prometteuses des matériaux bio-inspirés ou bio-mimétiques à structures hiérarchiques multiéchelles.

La mise en œuvre de ces nombreux concepts émergents nécessitera toujours plus de couplage entre chimie et procédés et devra s'appuyer fortement sur l'amélioration des techniques de caractérisation in situ et à l'échelle locale. Cette approche sera rendue d'autant plus nécessaire que les matériaux du futur seront issus de processus d'optimisation multi-physiques intégrant des architectures complexes, visant à leur conférer des propriétés multiples (ou multifonctionnelles), adossés à des outils de simulation validés de façon pertinente aux différentes échelles concernées.

Enfin, il faut le rappeler, la protection de l'environnement reste une préoccupation transversale majeure du domaine "Matériaux et Chimie" à travers le respect des réglementations, en vigueur et en cours d'élaboration, au service de la recherche de constituants et de procédés toujours plus garants du respect de la nature et de la santé.

## **DOMAINE D'ACTION PRIORITAIRE :**

### **LES NANOMATERIAUX EN VUE D'APPLICATIONS DEFENSE**

Impactant les propriétés mécaniques, thermiques, électriques, avec des fonctionnalités accrues, on ne peut omettre de citer le cas des nanomatériaux (nanotubes de carbone, nanofils pour textiles, polymères ou composites céramiques nanostructurés, nanomatériaux hybrides organiques inorganiques). Les efforts entrepris en 2006 afin de tirer parti au plus tôt de leurs propriétés inédites seront poursuivis et renforcés dans le futur afin d'aboutir à un ensemble fédéré et rationnel d'actions dans le domaine des nanomatériaux pour applications défense.

Les travaux initiés en 2006 autour des nanomatériaux pour le renforcement des propriétés de résistance mécanique des protections et têtes (synthèse de matériaux à grains ultrafins par SPS, verres métalliques massifs) et des oxydes nanostructurés (propriétés biocatalytiques en vue de la décontamination), seront complétées en 2007 dans le domaine de l'amélioration des propriétés des matériaux énergétiques (propulsion, détonique) en synergie avec le rapprochement de l'ISL et du CNRS sur ce thème. Le développement de nanomatériaux pour des applications thermostructurales sera également soutenu (notamment via le pôle de compétitivité Aéronautique Espace et Systèmes Embarqués - AESE). Les matériaux hybrides nanoporeux à précurseur organique qui présentent également certains aspects prometteurs (capteurs, furtivité) feront l'objet d'une attention soutenue.

A terme, les actions nanomatériaux devraient impacter en 2008 l'ensemble des sous-thématiques du domaine scientifique matériaux et chimie . ■

# Domaine 7

## BIOLOGIE

### Périmètre :

Le domaine recouvre :

- Le risque NRBC ;
- Les biotechnologies.

Pôles d'expertise DGA concernés : SHP, MC

Le périmètre du domaine Biologie, éminemment dual pour ses champs de recherche mais avec des spécificités défense pour les applications, est extrêmement vaste, allant de la microbiologie aux biotechnologies. Nombre de ces axes de recherche sont transversaux, recouvrant d'autres domaines (l'informatique, l'électronique, la physique...).

Plus que tout autre domaine, la biologie est en profonde évolution. La recherche sur le vivant est en phase très active d'analyse des génomes et entame une ère post-génomique. Les grandes questions de l'avenir seront de comprendre le rôle des gènes et leur régulation, celui de l'ADN non-codant, d'analyser les mécanismes de la plasticité des génomes des êtres vivants, et les mécanismes des flux de gènes dans la nature. Ceci implique un développement important de l'analyse des protéines, de leurs fonctions et de leurs interactions avec les acides nucléiques et les autres protéines. La microbiologie suivra ces tendances, avec en priorité la validation fonctionnelle des pistes tracées par la génomique. Ces progrès seront de plus en plus liés à ceux des micro-nanotechnologies et de la biophysique. Les percées des biotechnologies auront des conséquences sur la fabrication ou la manipulation d'organismes vivants ou de molécules issues ou dérivées d'organismes vivants. Elles nécessitent une veille constante et une alerte sur l'émergence d'une nouvelle technologie, sa diffusion et ses conséquences en termes de défense. Le domaine pluridisciplinaire des biotechnologies est aussi évoqué dans la partie 4 du POS.

### PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES ET INTERET DEFENSE

D'un point de vue de la défense, le domaine Biologie vise à maintenir et optimiser la capacité opérationnelle de l'homme dans son environnement, y compris au sein de systèmes d'armes. L'enjeu du domaine pour la défense est de disposer d'hommes au meilleur de leur condition physique et de leurs aptitudes, et de restaurer au mieux leurs fonctions vitales quand elles sont altérées par des agents du risque NRBC, des armes balistiques ou à létalité réduite voire le stress opérationnel.

Les orientations scientifiques abordées ci-dessous s'articulent en disciplines scientifiques qui concourent à l'amélioration :

- de la détection d'agents NRBC dans l'environnement et du diagnostic médical des mêmes agents (incluant entre autre la dosimétrie biologique opérationnelle), ;
- du diagnostic et du monitoring médical y compris avec une approche de télémédecine ;
- de la connaissance des mécanismes physiopathologiques que provoquent les agents NRBC, les armes à létalité réduite, les armes balistiques en vue de concevoir et valider de nouvelles contre-mesures médicales (traitement, prophylaxie, régénération tissulaire) ;
- de la protection physique et médicale, de la décontamination.

Une particularité française est que les maladies infectieuses d'intérêt défense ne sont que fort partiellement soutenues par le secteur de la recherche fondamentale civile. Il est donc crucial que la défense investisse dans la microbiologie réalisée dans les laboratoires civils, y compris dans des projets à retombées d'intérêt militaire à long terme.

### 1 > *Microbiologie, toxicologie*

Les mécanismes physiopathologiques de beaucoup de toxiques (par extension, on y inclut les toxiques industriels, les armes non létales), toxines ou agents infectieux viraux, bactériens ou parasitaires du risque NRBC sont encore très mal connus. Il y a donc un fort besoin de défense dans cette discipline. En microbiologie, il est nécessaire pour la défense de soutenir une recherche sur les mécanismes de la régulation des gènes des micro-organismes pathogènes, notamment ceux impliqués dans la virulence, et sur les mécanismes contribuant à la mobilité de ses gènes. En priorité, il est important de mieux connaître les mécanismes de pathogénicité, de toxinogénèse et de résistance aux anti-infectieux des agents pathogènes. L'amélioration de la connaissance des biofilms apporterait une aide à la décontamination des matériaux. En épidémiologie, la modélisation mathématique de l'évolution de cas initiaux de maladies infectieuses ne permet des prédictions que sur quelques agents. Il conviendrait de soutenir cet axe, en particulier pour valider et affiner le choix et la pertinence des paramètres, ainsi que les modèles mathématiques proposées, du fait de fortes attentes de la défense en matière d'alerte épidémiologique.

### 2 > *Immunologie*

Les mécanismes d'échappement au système immunitaire de micro-organismes tels que le parasite *Plasmodium falciparum*, sont responsables de l'échec des candidats vaccins élaborés jusqu'à ce jour. Ils restent encore très mal connus et sont à prendre en compte par la défense. La recherche de moyens d'obtenir une immunostimulation (y compris en s'adressant aux cytokines), peu développée à l'heure actuelle, est à promouvoir pour maintenir la capacité opérationnelle en conditions de stress opérationnel. L'amélioration de l'efficacité et de l'innocuité des vaccins contre des agents d'intérêt défense est à prendre en compte. Elle passe par la meilleure caractérisation de la nature de la réponse immunitaire aux agents du risque biologique, et du type d'anticorps suscités par l'agent.

### 3 > *Génomique*

La génomique intervient dans plusieurs sous-domaines clés de la biologie :

#### *Diagnostic et détection par biologie moléculaire.*

Des avancées significatives sont attendues en ce qui concerne la génomique comparative de souches et d'espèces. La génomique est actuellement tirée par le civil, mais la défense est un utilisateur obligé et doit donc s'intéresser aux agents pathogènes et aux technologies innovantes permettant la manipulation ou la synthèse d'agents infectieux. En effet, les défauts d'alerte (faux positifs/faux négatifs) pourraient avoir des conséquences très importantes sur l'effet de panique, l'incapacitation et les pertes humaines.

Pour la détection, il convient d'ajouter qu'à l'avenir la liste des agents infectieux potentiellement détectables risque d'évoluer avec par exemple de nouveaux virus non listés habituellement dans les armes biologiques (SARS, grippe aviaire...) ou des micro-organismes pathogènes totalement nouveaux. Ceci met l'accent sur l'importance de développer des méthodes de détection non spécifiques de 1<sup>ère</sup> intention (spectrographie de masse...) permettant de définir à partir d'un bruit de fond l'apparition de phénomènes insolites, orientant dans un 2<sup>ème</sup> temps vers une détection utilisant des techniques conventionnelles ou des techniques génomiques beaucoup plus spécifiques.

Ceci implique des avancées dans les techniques de séquençage, vers une amélioration notamment de leur fiabilité et de leur coût afin d'avoir la possibilité de pouvoir comparer les génomes de différentes souches d'une même espèce et des différentes espèces proches du pathogène d'intérêt, et d'ainsi déterminer les séquences génomiques pertinentes comme sondes de diagnostic, et de confirmer l'origine d'une souche. Augmenter la rapidité du séquençage permettrait d'identifier plus rapidement un nouvel agent issu du génie génétique.

*Recherche de nouvelles cibles thérapeutiques* par la connaissance du génome de l'agent pathogène (Cf. partie 4 du POS, § 4.4).

## 4 > Post-génomique

### Plasticité des génomes

Il convient d'avoir une particulière attention sur l'évolution des techniques permettant de synthétiser des gènes et des micro-organismes (synthèse à partir des données *in silico*) et celles permettant de manipuler sélectivement les gènes des micro-organismes pathogènes (DNA *shuffling* ou évolution moléculaire dirigée) et de produire les agents pathogènes totalement nouveaux ou des leurres. L'utilisation potentielle de nouveaux outils (ribozymes, RNA silencing...) pour contrôler ou « améliorer » la réplication de certains virus est à suivre particulièrement.

### Transcriptomique

Le séquençage systématique et l'annotation du génome d'un microorganisme pathogène révèlent en général un grand nombre de gènes de fonction inconnue, ce qui ne permet pas d'en entreprendre l'exploration fonctionnelle individuelle. De plus, tous les gènes ne sont pas transcrits à un moment donné de la vie de l'organisme. La DGA a promu un programme d'analyse de transcriptome de *P. falciparum*, fédérateur pour la communauté de recherche française sur de nouvelles cibles antipaludique. La connaissance du transcriptome des cellules de l'hôte soumis à l'agent pathogène permet également de cerner de nouvelles cibles thérapeutiques. Cependant, la fiabilité et la sensibilité des puces ADN en transcriptomique, ainsi que l'analyse statistique et bioinformatique des données générées par la transcriptomique, sont à améliorer. Ce type d'action doit être élargi et renforcé.

### Protéomique

La transcriptomique génère un grand nombre de données qu'il faut compléter, par la connaissance du niveau de traduction des gènes en protéines à la fois quantitatif et qualitatif. Les techniques utilisées (électrophorèse bidimensionnelle, Maldi-Tof, modélisation de structures tridimensionnelles, techniques d'étude des interactions protéines-protéines...) ont besoin d'être améliorées. Il serait intéressant de pouvoir générer, à haut débit, des protéines fixatrices de ligands contre chacun des éléments d'un protéome, par exemple les protéomes d'agents infectieux, d'agents NRBC ou de l'homme. Ces protéines fixatrices de ligands auraient de très nombreuses applications, comme outils analytiques pour des recherches fondamentales ou appliquées, pour la création de biocapteurs, et pour le développement de diagnostics et de molécules thérapeutiques.

### Physiologique, métabolomique

La connaissances des cytokines et chimiokines devrait être améliorée, surtout en ce qui concerne leur intrication dans les réseaux neuroendocriniens et immunitaires, dans le cadre d'une compréhension raisonnée des effets des stress opérationnels sur les performances des hommes en opération, de l'efficacité des mesures de prophylaxie contre les agents NRBC, de la sensibilité aux maladies infectieuses et intoxications du risque NRBC et aussi pour améliorer l'efficacité des contre-mesures médicales face au risque NRBC.

### Conception d'oligomères à potentialité thérapeutique et/ou diagnostique

A partir des connaissances de la génomique et post-génomique et d'études fonctionnelles, il a été découvert récemment la possibilité d'utiliser des fragments de séquences courtes, présentant l'avantage d'une facilité et d'un faible coût de production, soit d'ADN, soit d'ARN, soit de protéines. Ces oligomères sont soit inspirés, soit directement copiés du vivant. Pour ce qui concerne des molécules à propriétés anti microbiennes, citons : les aptamères (ADN dont on peut faire varier le répertoire de molécules reconnues), les microARN (issus de régions non codantes du génome humain ou du génomes d'agents du risque biologique dont les virus), les ankyrines (peptides dont on peut faire varier le répertoire de molécules reconnues). Des peptides, fragment immunogènes de cytokines, peuvent être vecteur d'une immunomodulation positive du système immunitaire.

## 5 > Modélisation de structures tridimensionnelles

La défense a un besoin crucial de traitements spécifiques de pathologies provoquées par les agents biologiques et chimiques, d'autant que l'on observe un accroissement dramatique de la multirésistance aux antibiotiques. La découverte de nouvelles cibles d'antibactériens et d'antiviraux, devrait favoriser à partir de protéines de structure cristallographique déterminée, le

développement déjà initié de la modélisation tridimensionnelle des interactions de ces protéines avec des inhibiteurs, futurs candidats médicaments.

Ce secteur est tiré par le civil, mais mérite une veille scientifique de la défense.

## **6 > Chimie**

Des progrès sont attendus pour faciliter la synthèse d'inhibiteurs chimiques et d'une multitude de dérivés (pour améliorer les temps d'obtention de leads) d'agents du risque NRBC. Les empreintes moléculaires constituent une discipline en essor intéressant la défense face au risque chimique.

## **7 > Bioingénierie des protéines principalement les anticorps**

La Défense a un fort besoin de molécules diagnostiques et thérapeutiques, spécifiques des agents biologiques. Les anticorps correspondent bien à ces besoins. Cependant des étapes de bioingénierie sont nécessaires, pour transformer les anticorps en biocapteurs et pour améliorer leur affinité et leur compatibilité avec l'organisme humain ("primatisation" et humanisation d'anticorps protecteurs contre les agents des risques B et C).

## **8 > Biologie cellulaire et tissulaire**

Les connaissances des mécanismes physiologiques de nombreux tissus sont à améliorer, notamment pour des fins de régénération tissulaire (tissu nerveux dans le cas de traumatismes crâniens, tissu cutané dans le cas de brûlures graves). La Défense est un investisseur nécessaire avec des compétences particulières, notamment en ce qui concerne les greffes cutanées.

## **9 > Physiologie**

Les mécanismes centraux et périphériques de la fatigue doivent être précisés afin d'en déduire des orientations pour des contre-mesures. La résistance des tissus aux chocs et aux impacts est un critère dimensionnant pour les conditions d'emploi et l'usage des systèmes de sauvetage. Les modèles de simulation des contraintes doivent permettre de prédire la limite de tolérance des opérateurs. La physiopathologie des atteintes aiguës et subaiguës du système locomoteur doit également être précisée. La vulnérabilité des tissus biologiques à certains types d'armes (NRBC, irradiations électro-magnétiques de forte puissance...) en vue d'établir des normes d'emploi et des mesures de protection constitue également une priorité défense.

## **DOMAINES D' ACTIONS PRIORITAIRES**

La conception de nouvelles molécules thérapeutiques vis-à-vis des virus de fièvres hémorragiques et encéphalites était identifiée comme axe prioritaire du POS 2005. Le lancement de deux REI, qui abordent la thérapie dans des directions totalement innovantes, l'une par la recherche de microARN anti-arenavirus, l'autre par des aptamères anti -filo, -Lassa et -Nipah virus, devrait contribuer au renouvellement le domaine des antiviraux. Cet axe d'effort sera renforcé, si possible par la création en 2007 d'un PEA visant à tester les synergies entre différents types d'antiviraux, y compris les anti-viraux à base d'analogues de nucléotides, et les stratégies d'ARN interférence, en généralisant l'approche à l'ensemble des virus d'intérêt défense, en choisissant les meilleures molécules et en impliquant des PME capables d'assurer un transfert des découvertes actuelles vers la production de nouveaux médicaments, qui pourrait être soutenue dans le cadre d'un programme spécifique en 2011.

Un deuxième axe prioritaire est la stimulation du système immunitaire, dans le but de renforcer les défenses intrinsèques de l'homme face aux agents NRBC dans un contexte de stress opérationnel. ■

# Domaine 8

## FACTEURS HUMAINS

### Périmètre :

Le domaine concerne la prise en compte de la composante humaine dans les systèmes de défense. Il recouvre :

- La protection de l'opérateur contre les contraintes environnementales
- Le maintien de la capacité opérationnelle
- Le soutien médical des forces en opération
- Les interfaces homme-système (IHM)
- L'homme comme acteur systémique

Pôles d'expertise DGA concernés : SHP, SDS

### PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES ET INTERET DEFENSE

La motivation de la défense pour les travaux dans le domaine des facteurs humains est directement liée à un constat : dans la tranche d'âge de la population générale concernée par les armées (20-50 ans), la mortalité est majoritairement d'origine accidentelle. En milieu militaire, l'analyse des accidents survenant au cours de l'entraînement des personnels et leur déploiement montre que les défaillances techniques sont négligeables au regard de l'implication du facteur humain. Les procédures d'évaluation des matériels et d'analyse de sécurité portent leurs fruits sur le versant technologique mais l'explosion technologique conduit à l'émergence de systèmes d'armes complexes qui demandent au combattant plus de résistance physique et psychologique, plus d'aptitudes, plus d'efficacité mentale, plus de connaissances, plus d'expertise opérationnelle et plus de célérité. L'enjeu de conservation des effectifs et de diagnostic des défaillances du couple homme-système passe aujourd'hui par une meilleure connaissance des mécanismes physio-psycho et sociologiques qui régissent le comportement des opérateurs en situation d'activité. Du point de vue de l'efficacité des moyens déployés, l'enjeu est encore dans la composante humaine, celle sur laquelle repose la décision ; la connaissance et la prise en compte des propriétés des utilisateurs dans la conception et l'élaboration des procédures d'emploi des matériels ouvrent un large champ d'amélioration du couple homme-système dans les systèmes d'armes comme dans les supports d'assistance médicale aux personnels.

Les facteurs humains sont à l'heure actuelle dominés par la connaissance et la modélisation des modes opérateurs, de leur variabilité inter-individuelle et de leur adaptation aux situations. Si l'objectif est une amélioration des interfaces homme-système (IHS), la course en avant imposée par le développement de nouvelles technologies et par leur mise à disposition des opérateurs conduit à une nécessaire adaptation des personnels en condition d'emploi. Une exploration plus systématique des mécanismes psychophysiologiques naturels et des processus cognitifs de contrôle impliqués dans la compréhension d'une situation en cours et dans la détermination du comportement de l'opérateur permettra une approche conceptuelle nouvelle des IHS en vue de faciliter, voire d'augmenter, ces processus naturels et optimiser ainsi le dialogue homme-système. En outre, les conditions extrêmes d'emploi auxquelles peuvent être confrontés des personnels de la défense, incluant le port d'équipements de protection, sollicitent largement les réactions d'adaptation individuelles et sont susceptibles d'influer sur l'efficacité de l'opérateur.

Le champ d'application du domaine des facteurs humains est par essence transversal aux autres domaines scientifiques car les systèmes technologiques n'ont de sens et de finalité que par la stratégie d'emploi des opérateurs. L'objectif est une meilleure prise en compte réciproque des besoins et des contraintes. Par ailleurs, l'intérêt défense recoupe les préoccupations d'autres secteurs d'application qui partagent des caractéristiques fondamentales telles qu'une activité à risque, l'usage de technologies avancées, la contrainte temporelle et environnementale et l'interactivité des acteurs. Enfin, il faut souligner que les besoins de la défense s'inscrivent souvent

dans la continuité des développements menés dans les domaines biologique et médical largement nourris par la recherche civile. Toutes les possibilités de transfert au profit des personnels militaires doivent être étudiées.

## **ORIENTATIONS SCIENTIFIQUES**

Pour être transversal, le domaine facteurs humains n'en est pas pour autant intuitif. Il fait appel à une littérature scientifique élaborée par des équipes expertes de différentes disciplines, partageant un objectif de modélisation des propriétés et comportements humains. Seuls le développement et la prise en compte de formalismes et de concepts éprouvés peuvent prétendre trouver leur place dans les champs d'application de la défense.

### **1 > Protection de l'opérateur contre les contraintes environnementales**

Si les effets sur l'homme des différents paramètres environnementaux (température, pression, accélération, rayonnement...) sont actuellement bien connus sur des profils de contraintes continus ou avec des variations régulières et progressives, les données concernent le plus souvent une contrainte environnementale isolée. Les connaissances théoriques et les modèles prédictifs manquent sur des rythmes de variation plus réalistes au regard de l'évolution des conditions d'emploi et sur les effets des combinaisons de contraintes. Par ailleurs, les moyens de protection proposés aux personnels doivent pouvoir bénéficier du développement de nouveaux matériaux, de systèmes de contrôle plus performants et anticipateurs, de la miniaturisation des technologies pour une amélioration du compromis efficacité/coût pour l'opérateur.

### **2 > Maintien de la capacité opérationnelle**

Même bien protégés, les personnels militaires voient progressivement leurs capacités opérationnelles s'altérer au cours d'engagements prolongés. Des systèmes de monitoring de l'état physiologique et cognitif du combattant sont attendus. Ils devront prendre en compte les mécanismes centraux et périphériques sous-tendant la performance physique et mentale de l'opérateur, intégrer plusieurs variables et permettre un diagnostic à une échelle de temps pertinente vis-à-vis de la dynamique militaire. Les travaux engagés dans le cadre du PEA SIACMACO « Système Intégré d'Aide Cognitive pour le Maintien et l'Amélioration des Capacités Opérationnelles » (2006-2010) en sont une première réalisation concrète. Des équipements d'aide au combattant doivent pouvoir repousser l'altération des capacités opérationnelles et mieux préserver l'intégrité des personnels à court et long terme.

### **3 > Soutien médical des forces en opération**

Le développement des moyens de communication rend possible un échange de très hauts flux de données sur des formats numériques complexes et permet ainsi de concentrer différents domaines d'expertise pour un traitement prenant en compte les avancées médicales les plus récentes, en des lieux extrêmes, en dépit de la dispersion des intervenants techniques. La démarche a été initiée au sein du PEA Télémédecine. Le dimensionnement de ces prouesses techniques et l'étendue des fonctionnalités offertes doivent cependant être adaptés en fonction des besoins des différents acteurs, des contraintes temporelles des actes techniques et de l'interdépendance des enjeux locaux.

Dans le domaine de la réhabilitation des personnels blessés ou affectés sur le plan physique, cognitif ou psychique par les conditions opérationnelles, les avancées en biotechnologies ouvrent la voie de nouveaux systèmes de suppléance sensorielle et/ou motrice qu'il sera nécessaire de compléter par des moyens d'évaluation du niveau d'aptitude, au décours de la réhabilitation.

### **4 > Les IHM Perception / Commande**

Les règles de conception d'interfaces alimentant les mécanismes psychophysiologiques naturels de la perception humaine doivent être privilégiées pour optimiser le débit de la prise d'information

et minimiser les conflits perceptifs. Les capacités des opérateurs à interpréter simultanément les données de différents capteurs et informations virtuelles doivent être précisément déterminées, essentiellement pour les informations visuelles et sonores dans un premier temps, puis concernant de nouveaux couplages sensoriels, diversifiant ainsi les modalités sensorielles disponibles. Le flux, la nature et la combinaison des informations dans les interfaces militaires posent le problème de la flexibilité des processus cognitifs sous-tendant la perception. Les facteurs attentionnels qui orientent la sélection de l'information dans cette affluence de données restent encore mal connus à ce niveau d'interférence des paramètres et de complexité de la tâche.

## **5 > L'homme acteur systémique**

L'échelle du poste de travail n'est plus représentative du domaine d'intervention de l'opérateur tant la complexité relationnelle des systèmes organisationnels rend interdépendantes les activités individuelles. De plus, les développements de la robotique font coexister en relations étroites des acteurs humains et des automates au degré de sophistication et d'autonomie variables selon les contextes. Il faut donc considérer l'homme comme composante d'un système coopératif plus ou moins étendu et dynamique. Le problème de la communication est central dans ce dispositif et se décline en termes de contenu, de débit et de continuité de l'information transmise, de sa durée de validité, d'émergence ou de transparence des flux échangés, d'étendue des traitements locaux, de hiérarchie décisionnelle, de niveau de confiance dans la performance locale. Certaines modalités de communication et de comportements interhumains sont ici difficilement transposables car elles font largement appel à l'implicite ou aux échanges émotionnels, non formalisés à ce jour.

Cependant, la plus-value humaine du système coopératif repose sur la prise en compte de concepts et de modèles cognitifs et psychosociaux construits pour des situations ouvertes et hautement interactives. La dimension dynamique et adaptative des processus d'interaction et de coopération au sein des systèmes distribués est essentielle pour assurer une réelle portée de ces travaux sur l'efficacité des dispositifs opérationnels.

## **6 > Robustesse**

L'environnement opérationnel est particulièrement caractérisé par son instabilité. Celle-ci peut atteindre tant l'environnement physique de l'action que l'état interne du combattant, ses relations à la technologie, aux acteurs du dispositif. Elle se traduit par l'introduction ou par la suppression de composants actifs. La résistance aux sources de perturbation est, dans le cadre d'une généralisation de l'approche par modélisation sur des facteurs d'échelle variables, un enjeu « facteurs humains » de premier plan. C'est la notion de robustesse qui se décline en notion de stress au niveau humain, de résilience dans le domaine technologique et de robustesse systémique au niveau d'un réseau d'acteurs humains ou non. Peu de données théoriques traduisent encore les processus adaptatifs nécessaires aux structures pour faire face aux perturbations, le plus souvent peu prévisibles, qui les abordent et se propagent dans les systèmes. Le traitement local et global de cette complexité doit encore être formalisé.

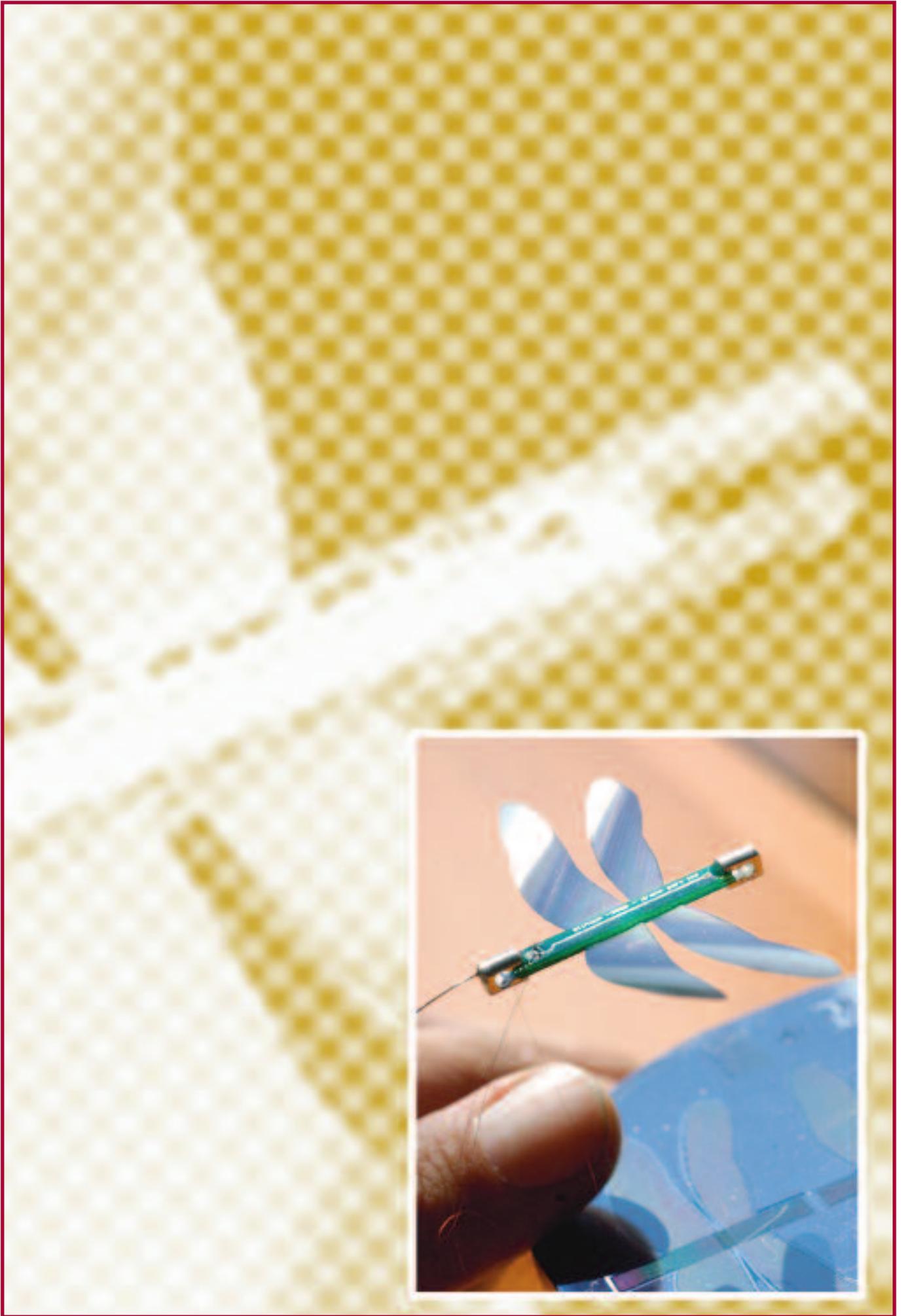
## **7 > Approche différentielle**

Aucun système biologique n'est strictement identique à son homologue. L'homme n'échappe bien évidemment pas à la règle. Cette variabilité interindividuelle s'exprime aussi bien dans les propriétés physiologiques que cognitives et sociologiques. Elle devient critique dans les organisations très complexes où des technologies de plus en plus sophistiquées, exploitant au plus près les diverses propriétés de l'opérateur humain sont mises en œuvre. Le dispositif n'est alors optimal que pour l'homme moyen. Il devient alors nécessaire de favoriser une approche différentielle des capacités au sein de la population d'opérateurs pour déterminer les critères de conformité aux modèles établis, voire pour identifier les critères d'ajustement pour les opérateurs plus excentriques. Cette approche, très complémentaire de la modélisation, n'est actuellement que peu alimentée dans la communauté scientifique des facteurs humains concernée par l'homme opérant. Elle doit être encouragée au même titre que ses corollaires que sont l'identification du

bassin de recrutement pour armer les nouveaux postes de travail, les critères de sélection, les limites médicales d'aptitude mais également les cursus de formation des personnels pour qu'ils acquièrent les aptitudes attendues. Enfin, c'est dans le même ordre d'idées que s'inscrit l'analyse de la variabilité physiologique et comportementale des personnels au cours des stades précoces du vieillissement, dans la gamme d'âges concernée par les emplois de défense.

## **DOMAINE D'ACTION PRIORITAIRE : L'INTERFACE CERVEAU-MACHINE**

Les progrès importants des techniques d'imagerie non invasive (IRM fonctionnelle, magnétoencéphalographie, électroencéphalographie...), ainsi que de technologies plus invasives, ouvrent de nouvelles possibilités d'observation et d'action sur le cerveau humain. Ces méthodes d'investigation mettent en évidence les stratégies de codage hiérarchiquement distribué mises en œuvre par le cerveau aussi bien pour analyser et stocker l'information provenant de l'environnement que pour planifier une action sur l'environnement. La mise à jour des bases neuronales des processus mentaux permet de mieux comprendre les processus cognitifs et les comportements humains. Les signaux recueillis et interprétés peuvent être exploités pour monitorer les processus dynamiques de la perception et de la prise de décision dans le cerveau, mais aussi pour interagir en temps réel avec les fonctions cognitives supérieures. Ces nouvelles avancées seront, dans un futur proche, à l'origine de technologies émergentes qui constitueront des aides intelligentes pour accroître l'efficacité et les capacités opérationnelles de l'opérateur, intégré aux systèmes d'armes, comme par exemple la réalité augmentée et la neurobotique (concept de « Brain Computer Interface »). Un interfaçage en temps réel entre activités cérébrales localisées et ordinateurs ou dispositifs artificiels est envisageable. La multimodalité naturelle tant sensorielle que motrice sera mieux exploitée sur des bases théoriques. La prise en compte des voies de traitement conscient et inconscient de la perception conduira, en conditions temporelles contraintes, à privilégier les circuits neurologiques courts entre les capteurs physiologiques et le niveau de décision. Elle réduira par là même le traitement perceptif, l'affectation de ressources et le temps entre signal externe et issue décisionnelle. ■



# Partie 4

## Axes d'effort pluridisciplinaires

Les transformations sociétales, économiques, industrielles et les problématiques énergétiques et environnementales créent de nouveaux besoins en recherche. Les frontières entre les disciplines construites au 19ème siècle sont devenues bien perméables et les objets matériels ou immatériels n'entrent plus dans la classification disciplinaire. Il est donc indispensable d'accroître la pluridisciplinarité tout en préservant les disciplines. Cette pluridisciplinarité, souvent source d'innovations de rupture, est un des facteurs importants des activités de la défense. Toutes les grandes applications militaires sont pluridisciplinaires et prennent en compte les grandes tendances actuelles que sont la miniaturisation, la numérisation, l'autonomie, la complexité... Parmi les grands axes pluridisciplinaires de la recherche, 6 ont été sélectionnés pour leur impact fort sur la défense.

Axes d'effort pluridisciplinaires						
Domaines scientifiques	Nano-technologies	Energie	Modélisation	Bio-technologies	Partage de l'info	Techn. imagerie
Info – math – autom. - traitement	■	■	■	■	■	■
Phys. & méca - fluides & solides	■	■	■			
Ondes et systèmes associés	■	■	■	■	■	■
Électronique	■	■		■	■	■
Optique et photonique	■		■	■	■	■
Matériaux et chimie	■	■	■	■		
Biologie	■	■	■	■		
Facteurs humains			■	■	■	■

Tableau 2 : corrélation entre domaines scientifiques et axes d'effort pluridisciplinaires

### NANOTECHNOLOGIES ET NANOSCIENCES

La réduction de taille à l'échelle nanométrique n'apporte pas uniquement le bénéfice de la compacité et du bas-coût réservé aux procédés de fabrication massivement parallèles : les nano-objets présentent aussi des propriétés physiques nouvelles et ouvrent ainsi le champ à de multiples activités scientifiques, qui sont désormais le domaine des nanosciences. Parmi ces nouvelles propriétés, on peut citer les phénomènes quantiques liés au confinement, les interactions ondes-matières quand les motifs des nano-objets sont de taille inférieure à la longueur d'onde, les rapports surface/volume exceptionnels, etc. Des disciplines nouvelles telles que la nanoélectronique, la nanophotonique, les nanomatériaux ou la nanobiologie sont maintenant des activités scientifiques à part entière, auxquelles il faut ajouter les activités critiques de nanoinstrumentation et de modélisation des nano-objets et de leurs interactions avec l'environnement.

Le potentiel des nanotechnologies à répondre à des besoins défense ou à ouvrir de nouvelles applications est déjà largement établi. Dans le contexte d'accélération du développement des nanotechnologies, il est nécessaire de poursuivre les activités de prospective engagées et de les renforcer par des activités de R&T.

Les domaines d'intérêt pour la défense sont nombreux, avec un effort particulier sur les sujets suivants.

## **1 > Synthèses et applications de nano objets unidimensionnels**

Les nano-objets unidimensionnels regroupent entre autres les nanotubes de carbone, les nanofils de semiconducteurs, les nanopiliers. Un premier axe d'effort est de développer les méthodes permettant d'en assurer la synthèse avec un bon contrôle de l'homogénéité de leurs propriétés et de l'uniformité de leur densité. Les technologies bas-coûts permettant d'éviter une nanostructuration trop lourde de la surface sont clairement à privilégier. Il s'agit ensuite d'être en mesure d'organiser, de fonctionnaliser, de contacter et de manipuler ces nano objets avec un intérêt particulier pour tout procédé permettant leur auto-organisation.

Les applications présentant à court ou à long terme un intérêt Défense sont notamment :

- les détecteurs d'agents chimiques ou biologiques : l'objectif est de pouvoir disposer de composants compacts, portables, de haute sensibilité et haute sélectivité, permettant une analyse multiplexée et disposant des moyens de communiquer distance. De par leur géométrie, les nano-objets unidimensionnels sont des candidats susceptibles d'obtenir des performances de sensibilité exceptionnelles ;
- l'application des nano-objets unidimensionnels à la génération - conversion d'énergie, en particulier à l'amélioration du rendement des cellules photovoltaïques, ainsi que leur utilisation comme constituants pour piles à combustibles ;
- l'utilisation de ces objets pour la conception et la fabrication de composants et de circuits micro-ondes. De par leurs propriétés électriques exceptionnelles, ils sont des éléments clés pour améliorer les performances des composants électroniques. Certains dispositifs comme des transistors à base de nanotubes de carbone ont été réalisés en laboratoires. D'autres composants permettant la génération et le traitement signaux hyperfréquences devraient répondre à terme aux exigences de performances de certaines applications défense (interrupteur, résonateur, nanoswitch, etc.).

## **2 > Intégration dans des dispositifs fonctionnels**

De nouveaux matériaux nanostructurés sont étudiés dans l'optique d'améliorer la protection des personnels et des systèmes d'armes. Ils peuvent être dédiés à la protection immédiate contre une menace ou être à la base de dispositifs permettant d'anticiper, de mesurer ou de communiquer.

Ainsi, les nanocomposites polymères, matériaux dont les propriétés mécaniques et thermiques sont augmentées de manière considérable, présentent une résistance au feu et des propriétés barrières remarquables. Le comportement mécanique des nanocomposites restent cependant à optimiser pour des applications défense spécifiques : comportement à la rupture, résistance, contrainte-déformation. Autres matériaux aux propriétés mécaniques remarquables, ceux incorporant des fluides rhéo-épaississants et qui permettent d'envisager l'élaboration de tissu de protection alliant flexibilité et blindage.

Des capteurs de grandeurs physiques (pression, température, contrainte, humidité, etc.) éventuellement interrogeables à distance sont d'ores et déjà utilisés pour surveiller la santé et mémoriser l'historique des événements survenant soit à des plates-formes, soit à des munitions. La maintenance des grandes structures est ainsi considérablement facilitée et, en parallèle, la sûreté de fonctionnement des munitions ou des missiles est augmentée. Dans leur prolongement, des capteurs capables de fonctionner dans des environnements sévères, voire hostiles, permettraient d'élargir considérablement les applications aussi bien pour la protection du fantassin que pour l'optimisation des systèmes d'armes.

Quoi de plus dimensionnant aujourd'hui dans les applications de défense que le concept lié à la disponibilité et à l'utilisation de l'Energie ?

Les systèmes d'armes actuels accroissent sans cesse leurs performances en termes de projection et de mobilité, la haute technologie est présente au coeur même du champ de bataille, et les notions d'énergie embarquée y sont omniprésentes. Dans ce contexte, la satisfaction des besoins opérationnels en production, transformation, stockage et disponibilité de l'énergie sous toutes ses formes (thermique, mécanique, chimique, électromagnétique, et même radiative) devient la garantie incontournable de l'efficacité des forces.

Technologiquement appuyée au 19<sup>ième</sup> siècle sur la transformation des carburants fossiles (charbon, puis pétrole et gaz), l'énergie est restée longtemps liée à la « puissance motrice du feu », dominée par les thermiciens et les thermodynamiciens. L'avènement des technologies de l'atome, et surtout, l'occurrence des deux chocs pétroliers successifs ont modifié depuis les années 1970 ce paysage et les questions d'énergie ont permis d'ouvrir largement le dialogue entre les diverses communautés scientifiques (ou parfois le débat).

La perspective annoncée de la fin des énergies fossiles (dont la date reste encore sujette à conjecture), ou (plus probablement) les coûts prohibitifs que la transformation de ces énergies occasionnera très vite, nécessitera de mettre en oeuvre des solutions alternatives, à la fois satisfaisantes sur le plan de la demande (qui ne cesse de progresser), mais également sur le plan des enjeux écologiques et sociétaux au coeur des préoccupations des Etats (effet de serre, biodiversité...).

Parallèlement aux plans d'actions envisageables dans le cadre de ces perspectives, il y a donc lieu de s'interroger et prévoir les synergies les plus fructueuses à mettre en oeuvre en fonction des besoins à venir dans le secteur de la Défense, et pour cela mettre en présence les disciplines à même d'offrir les solutions énergétiques de demain, ...voire d'après demain.

### **Besoins en puissance et/ou durée : synergies et perspectives.**

Cette partie concerne les applications récurrentes les plus consommatrices des systèmes : mobilité des aéronefs, des bâtiments, des véhicules, alimentation de systèmes de combat nouveaux utilisant l'énergie pulsée ou non, détections et transmissions aux grandes distances. De nombreuses pistes sont déjà citées, au confluent des Matériaux et de la Chimie, également associées aux sciences :

- de l'information et des composants (capteurs) pour toutes les solutions basées sur la gestion intelligente et l'hybridation améliorée des fonctionnements des systèmes moteurs (startstop, récupération des énergies de freinage, nouveaux systèmes de changement de vitesse...) avec en vue près de 25 % d'économie envisagée à terme par ce biais ;
- de la physique énergétique, des procédés et de la biologie pour les solutions qui mettront en jeu les carburants et biocarburants de synthèse futurs à partir carbone (post procédé Fischer-Tropsch, hydrocraquage) et de la biomasse (éthanol-carburants et bio-diesels, « sunfuel renewable » c'est-à-dire émettant moins de CO<sub>2</sub> que leur synthèse n'en absorbe), et qui devront s'accompagner de l'augmentation des rendements moteurs (atteignant dès à présent plus de 60 % pour certaines turbines à gaz fonctionnant à très haute température), ainsi que de la valorisation des sous-produits divers de la fabrication des bio-carburants (glycérols, lignines...);
- de la thermodynamique et des procédés avec les applications prometteuses liées à l'Hydrogène, en tant que combustible (principal ou d'appoint) dans des moteurs « Diesel-Hydrogène » ou source de protons dans les piles à combustible PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). La production de masse d'hydrogène nécessitant elle-même de l'énergie (électrolyse de l'eau ou cycles thermochimiques Iode-Soufre, Westinghouse) ne se concevra qu'en association avec d'autres sources et technologies fixes ou nomades (unités solaires ou nucléaires). Pour des puissances intermédiaires, l'utilisation couplée de l'hydrogène issu du reformage d'un carburant classique avec un convertisseur de type pile à combustible peut être envisagée à moyen terme lorsque son rendement pourra être optimisé. Enfin, l'hydrogène stocké sous forme solide, et utilisable dans les piles à combustible, est l'une des voies d'avenir

pour de nombreuses applications et mobilise de nombreux chercheurs de la communauté des composés d'intercalation (GFECI) sur des procédés de stockage divers (nanotubes de carbones, hydrures métalliques nanocomposites, matériaux hybrides nanoporeux, hydrates de clathrates sous pression...);

- de l'électrochimie dans les applications liées au stockage (charge) et décharge électrique instantanés ou continus (condensateurs et supercondensateurs, batteries). Les recherches en composés d'intercalation du graphite (ex : filière lithium) préfigurent les performances de demain (plusieurs centaines de F par g) et permettront d'atteindre des capacités inédites pour les applications de puissance instantanée (MFP, flash laser, lanceur EM....);
- de la physique des composants et de l'optique avec les applications issues de la filière photovoltaïque (déjà bien à l'oeuvre sur les satellites en particulier) extensible au cas des drones haute altitude (vol très stabilisé). Les cellules solaires de deuxième génération verront le Silicium remplacé par d'autres composés (In, Se, Cu...) et utiliseront mieux l'étendue du spectre solaire avec un rendement accru (projet européen sur des technologies de fil minces lancé en 2006). Quelques réflexions futuristes ont également entrevu la possibilité de transmettre l'énergie solaire collectée en orbite via des liaisons hertziennes micro-ondes (NASA).

### **Besoins en durée et compacité : un secteur en pleine évolution.**

Cette partie concerne des applications de puissance moins élevée en général, courantes sur les théâtres d'opérations : énergie embarquée par le combattant pour alimenter les différents systèmes de localisation, de détection, de transmission et de calcul ; appoint des systèmes pour veille discrète, énergie nécessaire aux capteurs abandonnés.

La pérennité et la fiabilité de ces sources est en revanche un facteur important (stockage, sûreté et durcissement aux agressions). On retrouve pour ce secteur où l'innovation est très active, les synergies des domaines :

- des nanosciences et des nanotechnologies pour les mini et micropiles à combustible, les matériaux pour membranes (élément critique des PEMFC) et les catalyseurs nanostructurés et nanocomposites, mais également de la biologie avec les catalyseurs enzymatiques ou bactériens (alternative possible au platine) et les concepts plus futuristes de « bio-nano fuel cells » ;
- de la thermique, des composants et de la biologie pour les futures micro sources thermoélectriques, voire bio-thermoélectriques (micro-composants thermoélectriques 2D biocompatible) ;
- des composants et de l'optique pour les filières photovoltaïques tout organique (à base de réseaux interpénétrés de polymères), ou hybride, ainsi que de la biologie pour la filière bio-photovoltaïque développée à partir de protéines photosensibles ;
- des nanosciences et de l'aérothermique dans la conception de futurs microgénérateurs électriques incluant microchambre de combustion et microturbines entraînées à plus de 50000 t/minute.

D'autres synergies dans les domaines civils ou militaires, mêlant les sciences des matériaux à la physique quantique (fusion froide, quantum magnétique...), la mécanique (moteurs rotatifs), la chimie quantique (supraconducteurs) apporteront dans les décennies qui viennent des ruptures inattendues et propres à répondre à ce défi majeur du XXI<sup>ème</sup> siècle.

## **MODELISATION**

Dans le domaine de la modélisation et de la simulation numérique, de nombreux verrous restent à franchir. Il faut citer principalement le traitement des géométries complexes, composés de matériaux également complexes et faisant intervenir des éléments de grandes tailles (système complet) et de petites tailles (composant, voire cellule biologique, matériaux) par rapport à la discrétisation admissible par les codes de calcul. Tous les domaines scientifiques sont concernés car ils interviennent pratiquement tous à un niveau donné d'un système complexe.

Un effort particulier doit donc être porté sur les techniques associées aux méthodes hybrides et à la modélisation multiphysique et multiéchelle qui sont nécessaires à de nombreuses disciplines comme l'aérodynamique, l'électromagnétisme, l'acoustique, l'optique, les matériaux

(nanotechnologies), les structures... De même, l'application de la théorie des systèmes complexes et de ses méthodes à la biologie (biologie systémique), et en particulier à l'intégration des données de génomique et de post-génomique, sera importante pour la manipulation rationnelle de voies métaboliques ou d'organismes entiers, avec comme objectifs : la production d'enzymes, de biocarburants ou d'intermédiaires chimiques, la transformation de ces intermédiaires et la dépollution.

Mais qui dit modélisation dit d'abord compréhension physique du problème basée sur l'usage intensif des mathématiques appliquées, puis sur la construction de modèles et enfin l'élaboration ou l'évaluation de structures ou de systèmes. Ainsi, il ne faudra pas négliger une approche complémentaire qui est la conception, au niveau continu, de modèles mathématiques approchés mieux adaptés à une résolution numérique que le problème initial. Cette problématique se pose dès qu'on est en présence d'un ou plusieurs petits paramètres et relève des techniques d'analyse asymptotique. Cela peut se révéler efficace pour prendre en compte des couches limites, des structures minces, des milieux très hétérogènes...

L'utilisation de méthodes analytiques (solutions exactes ou semi-exactes) dans la conception de codes de calcul pourra également se révéler importante pour exploiter les particularités d'un problème donné pour améliorer la précision d'un calcul et / ou en réduire le coût. Cette approche peut entrer dans la rubrique "Méthodes Hybrides" dans la mesure où il s'agira souvent de coupler méthodes analytiques et méthodes numériques. Ainsi, au delà des stratégies de calcul hautes performances (calculs parallèles, calculs distribués...), il s'agira de développer une approche réellement multiéchelle : couplage de méthodes numériques différentes, décomposition de domaine, raffinement de maillage ou utilisation d'un pas de temps local, éléments finis étendus (type Galerkin discontinu). Les approches stochastiques, statistiques et probabilistes, seront également utiles aussi bien pour la modélisation physique que pour l'analyse de performances.

En matière de modélisation numérique, il est probablement illusoire de concevoir un outil universel : la solution optimale est probablement de disposer d'une batterie d'outils qu'on doit pouvoir faire communiquer afin d'en exploiter les complémentarités. Ainsi, face à un problème présentant des difficultés spécifiques, le développement d'un outil ad hoc s'avèrera souvent nécessaire. Pour faire face aux difficultés inhérentes aux systèmes complexes, et qui se manifestent en amont, au stade de la spécification et de la conception générale, comme au stade de la vérification et de la validation, il s'agira de développer des modèles modulaires, plus ou moins fins, adaptés à différents points de vue, avant que leur conception ne soit pas figée et que leur réalisation matérielle ne soit pas trop avancée.

La place de l'homme, utilisateur de ces systèmes, ne devra pas être oubliée. Ainsi les développements de modèles comportementaux devront avoir une place grandissante dans le domaine de la simulation.

## **BIOTECHNOLOGIES**

Les biotechnologies pour la défense recouvrent des disciplines transverses :

- tant dans l'apport des disciplines des sciences de la matière à la biologie, comme c'est le cas notamment de la bioinformatique, de la biophysique, de la biochimie, des nanotechnologies ;
- que dans l'apport de la biologie à d'autres disciplines, comme c'est le cas des biomatériaux, de la bioénergétique et des bioréacteurs.

Etant donné la nécessité d'amener les analyses (diagnostic par imagerie médicale, dépistage d'agents NRBC) au plus prêt du terrain, les disciplines doivent non seulement interagir dans un but d'amélioration des connaissances mais aussi dans une perspective d'aboutir à des dispositifs intégrés, miniaturisés, robustes, fiables, aisés et souples d'emploi.

### **1 > Apport des sciences de la matière à la biologie**

#### **Protection des hommes et des installations**

Les vêtements intelligents à visée de tenue de protection sont à améliorer et à développer. Les concepts de filtres sont à revoir en tenant compte de l'apparition de nouveaux risques comme

ceux liés à la création de nanoparticules. Développer des surfaces, si possible de microsursaces actives, à base de matériaux fonctionnalisés à l'aide de molécules chimiques (par exemple des molécules cationiques) pourrait, par leurs propriétés bactéricides à développer, empêcher la formation de biofilms.

### **Dépistage des agents NRBC y compris nouveaux, prédiction de la menace, monitoring de fonctions biologiques**

Notamment du fait de la nécessité de détection dans l'air, la défense a un besoin fort de toute innovation permettant d'augmenter la sensibilité de dépistage du risque B et C par biopuces : miniaturisation avec les nanotechnologies, technologies favorisant l'hybridation de l'agent à détecter à la molécule cible, amélioration des dispositifs microfluidiques pour les "lab on chip", processus physiques sensibles à un très faible nombre d'évènements moléculaires. La spectrométrie appliquée à la biologie (spectrométrie de masse, de flamme), doit progresser à la fois pour la détection des agents NRBC et pour les études de protéomique.

Les biocapteurs feront partie de l'équipement de base du futur fantassin, avec notamment des capteurs chimiques à base de nanotubes de carbone, des capteurs thermiques qui devront être fiables et couplés à des signaux visant à prévenir le risque imminent de coup de chaleur ; à long terme en ce qui concerne le risque NRBC, un dispositif intégré couplant des puces multi-détection fiable (sans faux positifs ni faux négatifs) de l'ensemble des agents NRBC à des micropompes d'injection du bon antidote pour l'agent détecté, serait des plus utiles.

En épidémiologie, à la fois pour des besoins d'alerte et de mise en place des contre-mesures médicales, la défense a un fort besoin de modélisation mathématique d'épidémies à partir des cas princeps, avec confrontation aux données de terrain.

### **Compréhension des mécanismes physiopathologiques des agents NRBC, des toxiques et des armes à létalité réduite ; monitoring neurologiques**

La bioinformatique joue un rôle crucial dans l'analyse de la multitude de données de la génomique et post-génomique : l'assemblage des contigs, l'annotation des génomes, la présentation et l'analyse des résultats de comparaisons de multiples génomes, étapes indispensables à la compréhension de la physiopathogénie des bactéries, virus, parasites et des cellules cibles des agents NRBC.

Les nanotechnologies pour l'analyse de cellules (cell on chip) pourraient constituer une orientation de choix pour la miniaturisation des essais ex vivo, ainsi que pour des recherche analytiques sur les microorganismes pathogènes et sur les cellules de l'hôte cibles des agents NRBC, des armes à létalité réduites et des toxiques chimiques.

Bien que tirée par le civil, la défense a des attentes de progrès de la bio-imagerie à plusieurs échelles :

- à l'échelle de liens neuronaux, pour mieux comprendre les processus cognitifs et les comportements humains, en particulier pour monitorer les processus dynamiques de la perception et de la prise de décision dans le cerveau, et pour interagir en temps réel avec les fonctions cognitives supérieures ;
- à l'échelle moléculaire, pour d'une part améliorer la résolution des modèles de structure tridimensionnelle de complexes multi-protéiques, notamment pour l'optimisation d'inhibiteurs de molécules ou d'interactions moléculaires clés dans la pathogenèse des agents NRBC), et d'autre part visualiser le trajet intracellulaire d'une molécule unique de toxine (comme la toxine botulique), y compris les compartiments cellulaires cibles, notamment grâce à des progrès de techniques comme la microscopie en champ proche ou l'imagerie par seconde harmonique.

### **Conception de nouvelles thérapeutiques (traitement, vaccination)**

La bioinformatique sera de plus en plus amenée à contribuer à la conception et l'amélioration de molécules d'intérêt thérapeutique en microbiologie (y compris pour la découverte de microARN) ou en immunologie (peptides immunogènes issues de cytokines). Cependant, dans tous les domaines de la bioinformatique, il est important de confronter les modèles, qui ne sont que des outils, puissants certes, à la réalité de l'expérimentation biologique. L'amélioration d'algorithmes

d'aide à l'ingénierie des protéines, notamment des anticorps, permettrait de déterminer les positions d'acides aminés pouvant être modifiés à proximité du site de reconnaissance spécifique de l'antigène en tenant compte de contraintes de thermodynamique et de maintien de l'affinité antigène-anticorps.

La modélisation de formes, mouvements cellulaires est un domaine de recherche innovant qui à terme pourra apporter des solutions nouvelles de régénération tissulaire (peau, tissu osseux). Des processus physiques (outre les classiques UV) peuvent avoir des propriétés microbicides innovantes et très prometteuses.

Parmi les bionanoparticules à visées thérapeutiques, certaines pourront être très intéressantes pour la défense (nanoparticules servant de véhicules à l'hémoglobine par exemple).

En ce qui concerne la mise au point de nouvelles molécules thérapeutiques, la défense sera intéressée par des dispositifs facilitant le criblage de banque de molécules par la détection directe d'une interaction moléculaire avec un seuil d'affinité entre sonde (molécule chimique) et échantillon (cible pour un nouveau traitement d'un agent NRBC) sans avoir à mettre au point des tests de criblage spécifique de chaque cible.

## **2 > Apport de la biologie à d'autres disciplines**

### **Biomatériaux**

Des matériaux d'origine biologique fonctionnalisés ou non se profilent, comme les fibres d'adénovirus, qui se polymérisent naturellement en fibres très résistantes et qui permettent, entre autres, des utilisations comme greffes en chirurgie réparatrice ou des fonctionnalisations par liaisons covalentes de molécules à intérêt défense tels que répulsifs, insecticides...

### **Bioénergétique**

L'amélioration de l'activité spécifique et de la production par génie génétique des cellulases permettant la production d'éthanol à partir de biomasse pourrait diminuer le coût de production de ce biocarburant.

Des sous-produits de la production de biocarburants pourraient être valorisés en les transformant en polymères, plastiques et solvants actuellement obtenus à partir du pétrole.

Bien qu'envisagée uniquement en tant qu'apport secondaire d'énergie dans l'avenir, la mise en œuvre de molécules, organismes ou réactions biologiques comme les biomoteurs (F0-F1 ATPase mitochondriale), les biocarburants (les bactéries méthanogènes sont déjà bien connues), la biocatalyse électrique, peut apporter beaucoup de surprises positives.

### **Bioréacteurs**

Les bioréacteurs, qui seraient très utiles à la dépollution (y compris environnementale) et à la restauration de sites contaminés, peuvent connaître un regain d'intérêt par la recherche d'enzymes décontaminantes issues d'archae, ainsi que par la recherche de miniaturisation (micro-réacteurs).

### **Molécules et organismes ayant de propriétés physiques ou électroniques intéressant d'autres disciplines**

Les magnétosomes de bactéries magnétotactiques, sont non seulement un modèle de nano-cristaux magnétiques très homogènes à base de magnétite et de greigite, mais peuvent aussi s'avérer des réactifs biologiques intéressants pour des diagnostics par IRM. En bioélectronique, l'ADN semble d'ores et déjà s'avérer prometteur comme composant de transistor ce qui à terme peut constituer un apport important à de futures générations de supercalculateurs.

### **Commande de machines par l'homme**

La commande vocale, qui intéresse tout particulièrement la défense dans un contexte où l'homme doit effectuer de multiples tâches en interaction avec des machines, reste toujours un challenge scientifique. Dans la même perspective de simplification de mise en œuvre des tâches, la commande directe par le cerveau sans recourir à des dispositifs invasifs pour l'homme, est un but des plus intéressants à atteindre.

## **PARTAGE D'INFORMATION M4 (MULTIMODALE, MULTINIVEAU, MULTICRITERE, MULTI-UTILISATEUR)**

La maîtrise de l'information est aujourd'hui un facteur déterminant de supériorité tant tactique que stratégique. Cette information est véhiculée en permanence par les flux de parole, de texte, d'images (aussi bien au sens conventionnel qu'au sens d'images multicomposantes, comme en imagerie hyperspectrale) ou par la vidéo. Elle est disponible de manière pléthorique dans les bases de données et les réseaux, comme Internet. Enfin, les relations établies entre les différentes interprétations d'objets ou d'événements induisent une information de plus haut niveau qui permet d'acquérir des connaissances au-delà de la simple constatation des faits. Dans ce contexte, les enjeux actuels pour optimiser le partage de l'information dans un réseau fonctionnel d'acteurs sont relatifs à la qualité, à la quantité et à la communication des données de leur collecte à leur exploitation.

Au niveau de l'acquisition des données, les meilleures sont celles dans lesquelles l'information pertinente est accessible, il s'agit donc de privilégier une sophistication raisonnée des capteurs et de compléter les données brutes par des traitements adaptés. On distingue deux grands types de transformation des données. Le premier vise à optimiser l'émergence de l'information utile et repose essentiellement sur des techniques de traitement du signal. Les progrès attendus portent sur une meilleure adaptation aux caractéristiques physiques des données brutes et aux propriétés perceptives des utilisateurs. Le second type de transformation concerne la mise en perspective des informations obtenues, il relève de l'organisation typologique des données. C'est la base de la diffusion et du stockage de l'information (référencement en Bases de Données et de Connaissances, BdBc, réparties ou distribuées) sur des critères de contenu sémantique. Là encore, seuls des systèmes logiciels peuvent faire face au flux de données, leur adaptation aux processus cognitifs d'organisation des connaissances reste à parfaire.

Le stockage et la transformation des données font appel aux techniques de traitement du signal (domaine IMAT) notamment pour tous les aspects relatifs à la protection de l'information (vulnérabilité, traçage, intégrité) et pour la prise en compte des contraintes liées à la mobilité, la robustesse et la compression vis-à-vis des limitations techniques des canaux de transmission et de l'interconnexion des systèmes (interopérabilité des standards et des protocoles).

La masse et les flux sans cesse croissants d'information posent un réel problème d'exploitation au sein d'un réseau d'acteurs. Sous l'angle de la disponibilité de l'information, des systèmes d'aide pour rendre l'information accessible à chaque intervenant se font de plus en plus indispensables, incluant des règles de priorisation et de traçabilité. Indépendamment du choix actif de l'opérateur, la sélection des informations (brutes ou interprétées) présentées à chaque acteur soulève la question du tri. L'intelligence des systèmes doit-elle proposer des solutions adaptatives pour déterminer quelle information doit être sélectionnée pour chaque niveau décisionnel ? Avec quel format ? Et quelle traduction de son niveau de validité ?

Partager l'information n'a d'intérêt que pour alimenter les processus décisionnels. Ceux-ci sont du ressort de l'opérateur. C'est pourquoi les attentes portent plus particulièrement sur la prise en compte des mécanismes humains individuels et collectifs pour l'amélioration des solutions technologiques à chacune des étapes d'inclusion, de transformation et de dissémination de l'information dans les systèmes de Défense.

## **TECHNIQUES AVANCEES D'IMAGERIE**

Les conflits récents ont clairement mis en évidence l'importance de la fonction observation dans le domaine militaire. En effet, que ce soit pour le renseignement, la préparation d'une mission, la surveillance de zones ou pour l'évaluation des dommages infligés, il est essentiel aujourd'hui pour les forces armées de disposer de moyens leur permettant d'acquérir une connaissance aussi fine et exhaustive que possible d'une zone d'intérêt, et présentant un minimum de contraintes d'utilisation. Ainsi, les systèmes d'imagerie, que ce soit dans le domaine optique ou radar, sont aujourd'hui bien implantés au sein des forces et ont démontré un haut niveau de maturité technologique. Les sources de progrès dans ce domaine sont toutefois loin d'être taries et des perspectives très prometteuses se dessinent pour améliorer de façon significative les performances

des systèmes d'observation en terme de Détection-Reconnaissance-Identification, ou offrir de nouvelles fonctionnalités. Cette thématique fait ainsi l'objet d'une attention particulière dans les différents domaines scientifiques du POS.

Ainsi, l'augmentation de la résolution angulaire constitue un enjeu essentiel pour accroître la portée de nos systèmes d'observation. Dans ce domaine, un travail technologique important est à mener au niveau des composants pour, par exemple, l'amélioration des performances des radars imageurs en bande Ku, ou la réduction du pas des détecteurs infrarouge. Le développement des techniques de synthèse d'ouverture dans le domaine du radar constitue une autre voie pour accroître la résolution. A plus long terme, la transposition de cette approche au domaine optique devrait permettre un gain en résolution très significatif, au prix toutefois d'une complexité technologique accrue. Enfin, il faut souligner que l'obtention de très hautes résolutions angulaires depuis le sol ( $< 1$  mrad) avec des systèmes optiques nécessitera l'utilisation de l'optique adaptative pour la compensation des turbulences atmosphériques.

Un autre axe de rupture repose sur une meilleure utilisation des propriétés du champ électromagnétique diffusé et émis par une scène d'intérêt, avec notamment l'étude de ses caractéristiques spectrales et de polarisation. Ainsi, l'imagerie multi/hyper spectrale et/ou polarimétrique devrait permettre de conduire à une meilleure discrimination entre un objet d'intérêt et l'environnement dans lequel il évolue. A un niveau supérieur, la fusion d'images provenant de différents systèmes d'imagerie, optiques dans différentes bandes et radars, devrait permettre de bénéficier des complémentarités entre capteurs. Un travail important reste à mener du point de vue fondamental pour mieux comprendre le potentiel de ce type d'approche, mais aussi sur le plan technologique pour aboutir à des composants et architectures de haute performance compatibles des contraintes d'intégration militaire. Enfin, la gestion de ces images de vecteurs fait appel à des techniques de traitement d'images hautement évoluées faisant intervenir le facteur humain.

Les progrès attendus à court terme dans le domaine de l'imagerie active, radar et optique, permettront d'obtenir une cartographie tridimensionnelle de l'image, qui pourrait s'avérer essentielle dans des scénarios urbains par exemple. Un effort technologique important est toutefois requis pour amener à maturité des systèmes de ce type avec notamment le développement de détecteurs optiques matriciels à très faible temps de réponse et de très haute sensibilité.

L'imagerie à travers des milieux opaques à l'œil nu, qui constitue un des vieux rêves de l'humanité, pourrait bien se concrétiser dans les prochaines années. En effet, le rayonnement électromagnétique dans la gamme THz (100 GHz- quelques THz) présente des propriétés de pénétration tout à fait remarquables dans différents types de matériaux comme les tissus, certains plastiques, végétaux et matériaux de construction. Ces rayonnements se caractérisent en outre par des interactions fortes avec la plupart des explosifs et des agents biochimiques, qui se traduisent par la mise en évidence de signatures spécifiques. Des approches de ce type pourraient donc conduire à des fonctions comme la détection d'armes, d'explosifs ou d'agents biochimiques cachés dans des bagages, des colis ou sur des individus. On peut également penser à ce genre de concept, ou à des approches radar Ultra Large Bande associées à du retournement temporel, pour imager une scène à travers un mur ou derrière un rideau de végétation. La détection d'objets enterrés constitue un autre exemple de besoin défense pour lequel on peut espérer des percées grâce aux progrès réalisés dans le domaine de la tomographie radar.

De nombreuses questions se posent ainsi sur la marche à suivre pour développer le potentiel de ces technologies pour nos applications, et une réflexion approfondie a été lancée sur le sujet pour identifier les axes d'effort les plus prioritaires au niveau des composants, des architectures systèmes et des traitements de données.

Enfin, avec le développement des systèmes des drones ou des réseaux de capteurs abandonnés pour la veille, la miniaturisation des dispositifs et l'accroissement de leurs fonctionnalités constituent un axe d'effort essentiel, dans lequel des progrès significatifs sont attendus. Ainsi, différentes pistes pouvant conduire à une augmentation très significative de la compacité des systèmes d'imagerie infrarouge sont à l'étude. L'augmentation du champ d'observation est un autre exemple de sujet d'étude et des approches reposant sur des architectures optiques particulières combinées à un traitement d'images approprié pourraient par exemple permettre

une observation à 360° avec une résolution suffisante. La défense poursuit également un effort important dans le domaine des rétines artificielles programmables pour permettre l'intégration de fonctions de haut niveau comme la détection, la caractérisation et le pistage d'objets d'intérêt, au niveau du plan focal détecteur. Ces développements devraient conduire à la mise en place de systèmes d'imagerie compacts et autonomes, capables par exemple d'alerter un opérateur distant à partir d'un événement apparu sur zone. ■

# Glossaire

AED	Agence Européenne de Défense
ANR	Agence Nationale de la Recherche
ISL	Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis
NRBC	Nucléaire Radiologique Biologique et Chimique
ONERA	Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
PCRD	Programme Cadre de Recherche et Développement
PEA	Programme d'Etude Amont
PP30	Plan Prospectif à 30 ans
REI	Recherche Exploratoire et Innovation
TRL	Technology Readiness Level