

## GROUPE DE TRAVAIL TECHNOLOGIE

JP. Berger, B. Cugny, E. Defer, T. Donath, C. Langlade, PE. Martinez,  
F. Presseccq, P. Kern, I. Sagnes, PG. Tizien

### 1. Introduction

Le spatial est synonyme d'un environnement relativement hostile qui nécessite le développement de technologies adaptées.

Par ailleurs, actuellement émerge un besoin pour certains domaines, de disposer de mesures multipoints ainsi que de fortes capacités de revisite. Cette tendance conduit à envisager des missions basées sur des concepts de constellations qui pour être accessibles nécessitent une miniaturisation et des procédés de fabrication en séries permettant de réduire significativement les temps de réalisation et les coûts mais aussi d'assurer une bonne reproductibilité des performances.

En outre, les missions scientifiques continuent d'adresser des questionnements pointus qui requièrent des performances aux limites de l'état de l'art et induisent des instruments de complexité croissante.

Pour répondre à ces enjeux, le spatial doit innover en s'appuyant sur les technologies et des méthodes de réalisation qui émergent dans d'autres secteurs d'activités en évaluant leur potentiel pour les besoins des missions spatiales à venir. L'adaptation de ces innovations aux contraintes spécifiques du spatial est à évaluer ainsi que leurs capacités à améliorer les performances des futurs systèmes tout en répondant au besoin de minimiser coûts et durées de développement.

Dans cette optique, nous avons cherché au sein du groupe de travail à **identifier les technologies émergentes susceptibles d'ouvrir des perspectives d'innovation et de progrès dans le développement des charges utiles scientifiques.**

Compte tenu du champ technique potentiellement très large à traiter et afin d'éviter d'établir une liste exhaustive mais difficilement exploitable de toutes les technologies à soutenir pour préparer les missions de demain, l'approche proposée est d'identifier quelques « **lignes de force** » c'est-à-dire des domaines technologiques présentant un caractère générique susceptible d'avoir un apport transformant significatif pour la conception de futurs instruments scientifiques avec un horizon de maturité vers 2025. Nous avons choisi de faire ressortir une dizaine de thèmes pour permettre de déployer une dynamique constructive et efficace sur quelques années. Bien entendu une telle attention qui pourra mener à des actions « volontaristes » par le biais d'un accompagnement significatif de R&T, ne doit pas obérer le soutien à d'autres techniques jugées centrales et déjà bien identifiées dans le contexte des développements actuels.

Dans le cadre de cette réflexion, nous proposons également de favoriser une approche *bottom-up* (ou *techno push*) visant à amener à la connaissance des équipes projets proposant des missions spatiales, des techniques ou technologies disruptives susceptibles d'apporter des solutions en terme de performance, de miniaturisation, de durée de développement ou de coût par exemple, incluant la production de petites séries. Parmi les préoccupations figure le besoin de limiter autant que possible le recours au « sur-mesure » par l'utilisation et l'adaptation de filières technologiques génériques.

La vision *top-down* sur les besoins de technologies spécifiques requises pour de futurs instruments est assurée par les sorties des Groupes de travail thématiques TOSCA (Terre Océan Surface Continentale Atmosphère) - CERES (Comité d'Evaluation sur la Recherche et l'Exploration Spatiales). Le Groupe de travail « la R&D pour les moyens du futur » mis en œuvre dans le cadre de la prospective CNRS-INSU AA (Astronomie-Astrophysique) apporte par ailleurs une vision complémentaire précieuse.

Dans la mesure où un groupe de travail spécifique au domaine « Numérique et Données » a également été constitué dans le cadre du Séminaire de Prospective Scientifique du CNES, les techniques inhérentes à ces domaines (*Big data*, Intelligence Artificielle, ...) ne seront pas traitées directement dans ce document, mais seront abordées au travers de leur implémentation et apports dans les traitements bords.

## 2. Rôle de la R&T

Les activités de R&T ont toujours constitué un pilier essentiel de la préparation des programmes spatiaux. Dans un contexte où la compétition internationale s'accroît et où de nouveaux acteurs émergent, maintenir et consolider l'excellence française dans le domaine des « sciences spatiales », passe nécessairement par un programme de R&T ambitieux. Cependant, dans un contexte de ressources humaines et financières contraintes, il convient de cibler les efforts de R&T principalement dans les domaines sur lesquels nous disposons **d'atouts techniques originaux et innovants** par rapport à la concurrence internationale, en alliant à la fois prise de risque et efficacité. Cette stratégie a jusqu'à présent permis à la France d'être un acteur important des projets scientifiques dans le cadre des programmes européens de l'ESA et des principales agences spatiales internationales.

L'apport du programme R&T et Démonstrateur du CNES, dans le positionnement de la France sur certaines missions pionnières et innovantes illustre ce propos.

### 2.1. SWOT, altimètre large fauchée

Pour l'altimétrie à large fauchée, le développement dès 2009 du démonstrateur des deux chaînes de réception interférométrique (le « cœur » analogique) de l'instrument KaRin de la mission SWOT, a contribué à convaincre la NASA et le JPL d'associer le CNES et les scientifiques français au développement de l'altimètre leurs permettant d'être impliqués dans l'établissement des bilans de performances. Cet investissement a aussi contribué à développer au CNES et à Thales Alenia Space, une expertise unique en Europe, facilitant ainsi grandement le positionnement français pour la préparation en cours (phase A CNES WiSA en forte coordination avec l'ESA) de la première composante européenne qui intégrera un altimètre à fauchée (Copernicus NG / Sentinel 3-Topo).

### 2.2. MicroCarb, Spectromètre dispersif

Sur la base de son expertise sur les sondeurs infra-rouges, le CNES a contribué à la définition du spectromètre statique infra-rouge de la mission MicroCarb. La réalisation de cet instrument compact a pu être envisagée suite à des travaux de R&T menés à partir de 2010 sur la démonstration de faisabilité de réseaux échelle gravés répondant à des spécifications sévères. Ce développement mené avec la société Jobin-Yvon, lui a permis d'étoffer son catalogue de produits et d'offrir une alternative européenne aux produits américains.

### 2.3. ChemCam, SuperCam

Dans les années 2000, le CNES a entrepris avec la société Thalès Laser la spatialisation d'un laser miniaturisé répondant aux besoins de spectrométrie LIBS (Laser Induced Breakdown Spectrometry). Ce développement a permis à l'instrument Chemcam proposé par l'IRAP<sup>1</sup> d'être embarqué sur la mission NASA Mars Science Laboratory. L'effort R&T maintenu pour valoriser ce développement et améliorer les performances du laser, a conduit à la sélection de l'instrument SuperCam (LIBS + Raman) sur la mission NASA Mars2020.

### 2.4. Microcaméra 3D+

En 2015, le CNES démarre une R&T pour développer pour des missions de planétologie, une micro-caméra générique et intégrée, basée sur des capteurs d'images CMOS<sup>2</sup> matriciels commerciaux. Suivi par un programme Démonstrateur, cette micro-caméra développée par la société 3D+, a été sélectionnée par le projet SuperCam, le satellite étudiant Eyesat et le rover MMX du CNES. Au vu des performances, du niveau de maturité et du coût de ce produit, la société SODERN a sollicité le soutien R&T du CNES, pour réaliser à partir de cette micro-caméra des senseurs stellaires bas coût, nommé Auriga, pour répondre à l'appel d'offre du projet de constellation OneWeb visant un accès internet spatial. Par ce soutien, SODERN a été sélectionné pour fournir plus d'un millier de senseurs stellaires. Parallèlement, la société 3D+ sollicitée pour la fourniture de ces micro-caméras par de multiples acteurs du spatial, a engagé une nouvelle R&T CNES visant une version plus performante.

### 2.5. Retour d'expérience

L'excellence française dans le domaine des sciences spatiales est indéniable et reconnue internationalement. Toutefois, l'arrivée de nouveaux pays accroît la concurrence mais peut également ouvrir de nouvelles opportunités. Pour rester attractifs et crédibles, il faut disposer d'un programme de R&T ambitieux pour préparer les concepts instrumentaux originaux et innovants par rapport à la concurrence internationale.

**La R&T doit constituer une priorité dans la stratégie du CNES et des laboratoires scientifiques. Le CNES doit y consacrer un budget compatible des ambitions nationales. Les laboratoires et le CNES**

<sup>1</sup> Institut de Recherche en Astronomie et Planétologie

<sup>2</sup> Complementary Metal Oxide Semiconductor

doivent maintenir un niveau de ressources humaines pérenne sur la préparation du futur, niveau ne devant pas fluctuer significativement au gré des contraintes projets.

### 3. Identification des lignes de force

#### 3.1. Moyens et Plateformes technologiques

La communauté spatiale et plus particulièrement le CNES et l'INSU ont commencé à s'intéresser aux micro/nano technologies pour les systèmes spatiaux au milieu des années 90. Le retour d'expérience de ces 20 années de veille active ponctuées d'activités de recherche et de développement est mitigé : les composants / instruments imaginés, basés sur les micro/nano-technologies, sont aujourd'hui réalités et utilisés (switch RF, accéléromètres, gyroscope, capteurs...), mais uniquement dans le secteur non spatial. Les raisons principales sont le coût de développement des produits (plusieurs dizaines de M€), la nécessité de disposer de fonderies suffisamment souple d'emploi et le fait que les fonctions visées même si elles apportent un gain significatif pour les missions spatiales peuvent avoir recours à des technologies alternatives plus conventionnelles. Il existe cependant un créneau pour l'utilisation des micro/nano-technologies à des fins spatiales : les dispositifs ne nécessitant pas de développements technologiques spécifiques et lourds, et donc réalisables sur les filières existantes. Hormis ce créneau couvrant toutefois un nombre important d'applications, l'utilisation des MEMS/MOEMS<sup>3</sup> dans le spatial doit reposer principalement sur des produits commerciaux.

En revanche un gain conséquent est escompté par la réalisation de systèmes instrumentaux à base de micro technologies, en termes d'encombrement bien entendu, mais aussi pour simplifier fortement les phases AIT<sup>4</sup> en utilisant des composants intégrant un nombre important de fonctions, notamment en optique.

L'offre en micro-technologies en France repose sur un ensemble de plateformes technologiques académiques pilotées par le CNRS et le CEA, regroupées au sein du réseau RENATECH et sur une offre plus discrète de quelques PME essayées par les laboratoires de recherche.

##### 3.1.1. Plateformes technologiques académiques

La France dispose d'un réseau distribué de plateformes technologiques de micro et nano-fabrication avec 15000 m<sup>2</sup> de salles blanches réparties sur six sites et une main d'œuvre technique d'environ 400 personnes soutenant les activités de recherche en micro & nanotechnologies allant de la recherche fondamentale aux applications industrielles.

Ces plateformes sont organisées par le réseau RENATECH (CNRS-INSIS) et le CEA-Leti. Elles bénéficient du programme « Recherche Technologique de Base » (RTB) soutenu par l'ANR depuis 2004 pour ses investissements. En tant qu'infrastructure nationale de recherche, ces plateformes sont un pilier clé de la Stratégie Nationale de Recherche et d'Innovation (SNRI) permettant à la France de maintenir sa position dans le domaine des nano-technologies.

Ce réseau se concentre autour de 4 domaines technologiques stratégiques (Micro & nano électronique / spintronique, MEMS/NEMS/MOEMS & acoustique, Photonique, Micro & nano pour la biologie) et 1 domaine transverse (Caractérisation / Instrumentation).

Ces plateformes sont un outil indispensable à la recherche académique mais restent en partie ouvertes pour des recherches très appliquées, voire la réalisation de démonstrateurs à plus haut TRL<sup>5</sup> à des fins industrielles ou applicatives. C'est dans ce cadre qu'elles sont utilisées parfois pour les besoins spatiaux (Diodes Schottky THz et sub THz en coopération étroite entre C2N et LERMA pour l'instrument SWI-Submillimeter Wave Instrument de la mission ESA JUICE). Cependant, les impératifs de qualité et de fiabilité des matériels spatiaux sont difficilement conciliables avec la réalité de ces plateformes : TRL insuffisants, traçabilité, maintien d'une technologie dans le temps long du spatial (typiquement 15 ans). Ce dernier point pose aussi la question de la pérennité des moyens humains et matériels dans le temps.

Cette offre de « fonderie » se concentre surtout sur les aspects « front-end », objets de recherche dans les laboratoires scientifiques. Les échanges entre ces laboratoires scientifiques et les laboratoires spatiaux, plus largement la communauté spatiale, restent limités induisant une méconnaissance de l'expertise des uns et des besoins des autres. Il est nécessaire de **faciliter l'accès aux centrales technologiques académiques, principalement par un renforcement des liens entre les instituts INSIS et INP du CNRS et les concepteurs d'instruments spatiaux (CNES, CNRS-INSU, CEA...).**

##### 3.1.2. Plateformes techno industrielles

Le paysage industriel français en matière de micro-technologie est très restreint : seuls trois industriels sont capables de fournir des prestations compatibles avec les exigences du spatial sans toutefois maîtriser la chaîne complète de la valeur, à l'exception de TRONICS qui maîtrise toutes les technologies nécessaires mais dans

<sup>3</sup> MEMS (Micro Electro Mechanical System), MOEMS (Micro Opto Electro Mechanical System), NEMS (Nano Electro Mechanical System)

<sup>4</sup> Assemblage, Intégration et Test

<sup>5</sup> Technological Readiness Level

le domaine restreint de l'inertiel. Freq|Sys s'est spécialisé dans les technologies non silicium pour capteurs et AirMEMS dans les MEMS RF. Pour les plus gros volumes, les fonderies du groupe ST Microelectronics commencent à s'ouvrir.

Au niveau européen, l'offre est un peu plus large, surtout côté Allemand (Instituts Fraunhofer) ou Suisse (CSEM et IMT Neuchâtel). On peut aussi noter la présence d'une fonderie réellement ouverte et industrielle en Hollande (Fonderie historique Philips).

Cependant, plus la fonderie est industrielle, plus il est difficile d'y accéder pour de petites séries caractéristiques du besoin spatial et la compétitivité industrielle rend difficile l'accès aux informations sur les procédés technologiques. De plus, sur ces fonderies, le ticket d'entrée pour la réalisation d'un composant spécifique est de plusieurs millions d'euros.

### 3.1.3. Intégration système des micro-technologies

L'utilisation des micro-technologies dans les équipements spatiaux passe par une intégration faisant appel à des techniques peu ou pas maîtrisées voire absentes des plateformes technologiques académiques. On peut citer par exemple les techniques de packaging, la connectique, les interfaces optiques, l'électronique durcie ainsi que les interfaces mécaniques. Dans le cas des plateformes industrielles, ces techniques existent mais ne sont généralement pas compatibles de l'environnement spatial et demandent un effort de qualification. La solution bien souvent utilisée consiste alors à faire appel au cas par cas à des capacités « back-end » chez des industriels du spatial (HCM, 3D+...) et à des technologies durcies qualifiées pour la partie électronique. Plus localement, au sein des laboratoires du réseau RENATECH, des liens de sous-traitance existent. Au cas par cas les laboratoires spécialistes de l'instrumentation, parfois associés à des PME, ont pu aussi développer un savoir-faire très spécifique pour adresser cette question de l'intégration système, notamment pour la photonique en interférométrie et en spectroscopie.

Ce besoin étant général aux dispositifs nano/micro technologiques, il est souhaitable de **soutenir la mise en place avec l'appui de RENATECH ou d'une autre infrastructure, d'une capacité pérenne d'intégration/encapsulation des micro-technologies qui soit compatible avec les exigences du spatial.**

## 3.2. Fabrication additive (FA)

La fabrication additive est une technologie en plein essor dans de nombreux secteurs. Le spatial y voit de forts intérêts : optimisation performance-masse, réduction d'interfaces, fonctionnalisation, prototypage, simplification des phases d'AIT, etc. Toutefois, cette technologie doit encore monter en maturité pour devenir industrialisable et une normalisation est nécessaire afin d'accompagner concepteurs et fabricants.

### 3.2.1. Formalisation de règles de design, de conception, de vérification et de test

L'optimisation topologique permet la répartition de matière dans un volume alloué afin de converger vers la forme et la fonctionnalité souhaitées en fonction de critères prédéfinis (masse, tenue, raideur, « Design for Demise » pour problématique LOS<sup>6</sup>, etc). Il faut donc développer des moyens et méthodes de modélisation et d'optimisation qui devront être partagés.

Les pièces issues de FA ne sont généralement pas utilisables en l'état et nécessitent des post traitements thermiques ou de finition. Dans le cas des pièces métalliques, les post traitements et les recettes traditionnellement mises en œuvre peuvent se trouver inopérantes voire dégrader les pièces. De nouveaux traitements adaptés sont actuellement en développement.

Les formes complexes accessibles avec la FA ne peuvent être contrôlées par les moyens conventionnels sans des surcoûts importants. Les méthodes de spécifications devront donc évoluer du fait que les normes ISO ne sont pas adaptées à ce nouveau procédé de fabrication pour encadrer les géométries définies sans tolérance.

Par ailleurs ces nouvelles méthodes de fabrication engendrent des défauts spécifiques que les nouvelles méthodes d'investigation mettent en exergue sans qu'on puisse aujourd'hui quantifier leur réelle nocivité. Les techniques de Contrôle Non Destructif doivent donc être adaptées à ces nouvelles structures et les critères d'acceptation réétudiés. L'utilisation de contrôle in-situ lors de la fabrication des pièces ainsi que le recours élargi à de la simulation des procédés sont également des voies d'anticipation en cours de développement.

### 3.2.2. Caractériser les matériaux utilisables en FA

De manière à assurer la fiabilité des pièces par FA, il est essentiel de garantir la qualité des matériaux utilisés dans le procédé, notamment la poudre, tout autant que les paramètres machine sélectionnés pour la production. En fonction de l'application, il s'agit de contrôler la production d'une poudre de qualité, de prévoir la criticité de chaque type de défaut et de définir un seuil d'acceptabilité pour garantir les propriétés des pièces finales fabriquées. La possibilité de recycler les poudres doit également être considérée.

<sup>6</sup> Loi relative aux Opérations Spatiales

Les premières applications série de pièces aéronautiques ont amené une prise de conscience et un début de standardisation de l'ensemble du processus qui va ainsi gagner en maturité et fiabilité industrielles.

De nombreux matériaux sont disponibles avec des niveaux de maturité variés, notamment pour des applications spatiales.

L'impression 3D de plastiques se décline sous de multiples variations et souffre d'un manque de caractérisation des matériaux obtenus ainsi que d'une méconnaissance des propriétés des matériaux utilisés. La technologie évolue vers des matériaux de plus en plus techniques pouvant potentiellement répondre aux contraintes du spatial. La fabrication additive de polymères reste une option à analyser sérieusement.

Certains matériaux métalliques, comme le titane, sont compatibles avec les procédés de FA, d'autres comme l'aluminium ne le sont pas en l'état. De nombreuses études théoriques et expérimentales en lien avec les fondeurs sont en cours pour développer de nouvelles nuances d'alliages, en particulier d'aluminium dédiées à la FA.

Concernant les matériaux céramiques, le nitrure et le carbure de silicium sont, par exemple, deux matériaux possédant des propriétés intéressantes pour la réalisation d'instruments optiques. Leur utilisation pour des pièces structurales, en lieu et place de métaux tels que l'Invar, permet un gain de masse de l'ordre de 60%, sans sacrifier la stabilité dimensionnelle. Les usinages de finition de ce type de pièce sont particulièrement longs, délicats et coûteux avant comme après frittage. Ces pièces sont souvent sur le chemin critique du planning projet avec un fort risque d'engorgement des moyens spécifiques utilisés. D'autre part l'alumine bien que possédant des performances moindres fait l'objet de nombreuses discussions sur des pièces non structurales car son utilisation en FA est bien plus mûre. La fabrication additive appliquée à ce type de matériaux autoriserait la construction de formes complexes voire non usinables conventionnellement en une seule opération.

L'utilisation de multi-matériaux en FA est aujourd'hui délicate. Une juxtaposition de procédés est possible mais amène une augmentation des temps et coûts de fabrication et une perte de précision. Le recours à une technologie unique, adaptée à tous les matériaux serait nécessaire mais aujourd'hui peu réaliste. Dans le cas de l'association de plusieurs matériaux de même type (métalliques, polymères) les stratégies de fabrication et les exigences de recyclage contraignent encore largement la liberté de formes possibles.

### 3.3. Matériaux et structure

Les matériaux restent un enjeu essentiel dans le processus d'innovation. Les avancées dans le domaine permettent régulièrement de dépasser les verrous technologiques ou apporter de l'innovation linéaire. Le sujet est extrêmement riche.

Au-delà du matériau lui-même qu'il soit structurel, fonctionnel ou les deux, les matériaux sont présents dans les produits mais aussi dans les processus de production où on les retrouve en matière première, semi finis ou finis. Les procédés de fabrication associés sont également à considérer dans les avancés car ils peuvent apporter une modification des méthodes de conception menant à des gains techniques importants. Ce changement doit rester un point de vigilance qu'il faut accompagner afin de continuer de proposer des solutions cohérentes pour les missions spatiales.

S'il n'est pas identifié de rupture technologique à proprement parlé dans le domaine des matériaux, il faut **assurer une veille sur les développements qui sont conduits dans les laboratoires et leur prise en compte dans l'industrie** notamment automobile ou aéronautique synonyme de montée en maturité. Pour les applications structurelles, les thermoplastiques ou les composites thermodurcissables peuvent être considérés comme des alternatives très intéressantes.

Les matériaux actifs (piézoélectrique, alliage à mémoire de forme) constituent également un domaine d'intérêt pour le spatial pour la réalisation d'actionneurs et de systèmes de déploiement d'appendices.

Notons également l'émergence de la technique d'impression 4D, qui consiste à doter l'impression 3D d'une quatrième dimension : le temps. Les pièces imprimées changent de forme et se transforment dans le temps.

Ce panorama incite donc à **exploiter le potentiel de la fabrication additive 3D et 4D, en s'appuyant sur des centres d'expertise et de production du domaine. Il sera utile à terme de viser une « labellisation spatiale » de tels centres.**

#### 3.3.1. Contrainte norme REACH<sup>7</sup>

La réglementation européenne Reach impose des contraintes à prendre en compte lors du choix des matériaux, des composants mécaniques et des procédés qui sont utilisés dans les projets spatiaux. Le règlement a pour objectif d'enregistrer et évaluer les substances chimiques produites ou importées dans l'Union Européenne, et procéder à des interdictions d'utilisation. Ce règlement Reach impacte le domaine spatial comme tous les autres domaines industriels. Au-delà des restrictions imposées, cette réglementation apparaît néanmoins

<sup>7</sup> Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals

comme un levier d'innovation, imposant par la disparition de matériaux et procédés critiques, de proposer de nouveaux designs et nouvelles approches.

### 3.3.2. Structures

**L'étude des structures déployables « complexes » est un axe de recherche important pour de nombreuses applications.**

Pour les plateformes et dans le cadre de la miniaturisation des systèmes, on peut mentionner le cas des générateurs solaires où l'objectif est d'obtenir de la compacité au lancement tout en disposant en orbite d'une surface utile maximale afin d'apporter plus de puissance électrique.

Concernant les charges utiles, les antennes sont des cibles historiques de ces technologies, dont les solutions techniques restent à fiabiliser. Sur des concepts plus prospectifs, les télescopes déployables sont étudiés à plusieurs titres tout en visant la miniaturisation : instruments à haut niveau de performance embarquables sur de plus petites plateformes, production en série de dispositifs compacts éventuellement au détriment de la performance optique, compatibles des programmes de constellations par exemple.

La mise à distance de capteurs, notamment scientifiques, pour éviter la perturbation électromagnétique induite par la plateforme est un besoin critique pour les charges utiles embarquées sur de petites plateformes. En effet, les contraintes (encombrement, motorisation passive, stabilité, raideur des harnais...) sont actuellement problématiques pour les technologies usuelles. L'effort est à poursuivre car les concepts étudiés n'ont pas encore atteint le TRL requis pour répondre aux besoins.

## 3.4. Chaîne de détection

### 3.4.1. Les besoins à adresser

Pour répondre aux besoins des missions scientifiques (Observation de la Terre et Sciences de l'Univers), il est nécessaire de disposer de détecteurs et d'électroniques de lecture souvent à la limite des performances actuellement accessibles, couvrant les bandes allant des rayons gamma, X, UV, visible, infrarouge (1,8 à 18  $\mu\text{m}$ ) jusqu'au submillimétrique avec des gammes de sensibilité, de dynamiques et cadences d'échantillonnages qui peuvent être très étendues suivant les types de mesure et les environnements d'acquisition : mode comptage de photons pour missions astronomie et Lidar ou forts flux de photons en environnement terrestre par exemple. La chaîne de détection contraint la plupart du temps fortement le bilan de performances des instruments scientifiques. Le plan focal, pouvant intégrer plusieurs matrices de détecteurs et leurs électroniques, nécessite très souvent un refroidissement jusqu'à quelques dizaines de Kelvin (IR) voir quelques dizaines de mK pour assurer la performance et limiter le bruit instrumental. Des efforts de développement sont aussi à mener pour l'optimisation du plan focal (géométrie, nombre de détecteurs, électroniques, interfaces thermiques...). Son environnement représente également un enjeu critique pour atteindre la performance et limiter la consommation et la taille de l'instrument.

Par ailleurs, l'intégration de fonctions évoluées directement sur le pixel (numérisation / comptage de photons, polarisation, filtrage, les micro-obturbateurs, calcul in pixel, temps de vol, sources intégrées...) constitue un axe de progrès prometteur à soutenir. Par exemple, atteindre des opérations en mode comptage de photons à très haute cadence, éventuellement directement « on-chip », permettrait de répondre à des exigences plus contraignantes en termes de sensibilité, de dynamique de signal pour des missions astronomie, d'interférométrie à fort contraste, de Lidar ou de forts flux de photons en environnement terrestre.

### 3.4.2. Limiter les développements de composants « spécifiques »

La production de matrices de détecteurs nécessite une succession de couches/étapes technologiques sophistiquées incluant circuit de détection (couche photosensible), circuit de lecture, amincissement, filtre, antireflet, boîtier hermétique avec fenêtre transparente, flex, etc. La maîtrise et la reproductibilité de la technologie sont incontournables pour garantir la performance (sensibilité, linéarité, courant d'obscurité, vitesse de lecture...). Pour les applications spatiales, la filière technologique doit garantir la tenue à un environnement sévère et offrir une accessibilité sur la durée du développement d'une mission.

Le retour d'expérience des projets en cours nous enseigne que l'utilisation d'un composant industriel disponible sur étagère (CMV 4000 pour microcaméra 3D+, composant standard IR Lynred<sup>8</sup> moyennant évaluation spécifique et sélection) peut répondre aux besoins tout en étant a priori plus sûr et moins onéreux que le développement d'un détecteur à façon. Dans ce dernier cas, l'optimisation des performances (longueur d'onde de coupure, sensibilité, format...) conduit à reprendre certaines couches technologiques « sensibles » ce qui affecte la fiabilité du procédé de fabrication induisant souvent retards et surcoût.

A contrario, dans certains cas, il est essentiel de pouvoir disposer « sur étagère » des technologies les plus critiques aux plus hautes performances, avec un niveau de maturité permettant une production en série

<sup>8</sup> Ex Sofradir

suffisamment grande pour en consolider le modèle économique. Pour l'infrarouge, la consolidation d'une filière française est primordiale. L'augmentation significative du besoin, notamment pour l'instrumentation sol pour les très grands télescopes en cours de construction (plusieurs dizaines de matrices 4kx4k commandées récemment par l'ESO pour la première génération des instruments ELT<sup>9</sup>), doit conduire à revoir le recours au seul fournisseur américain actuel. Ce besoin correspond à la production actuelle de Lynred pour ses principales applications commerciales en technologie HgCdTe.

**Dans le domaine du visible et de l'infrarouge, il convient de continuer à soutenir en anticipation des projets les développements pour initier ou sécuriser les briques technologiques les plus critiques en incluant les aspects « packaging » et en orientant ces efforts vers les technologies génériques (limitation de variantes) répondant aux applications principales du sol et du spatial. De tels efforts visent à servir d'effets de levier pour mobiliser ultérieurement les budgets conséquents (Europe, régions, montage interministériels) qui sont indispensables pour la mise en place de nouvelles filières adressant un marché commercial (cf efforts déployés pour le développement du détecteur Alpha de Lynred équivalent de l'H2RG de Teledyne).**

**Pour les autres bandes spectrales, compte tenu de l'absence d'une filière industrielle ou d'un véritable marché identifié répondant aux besoins très spécifiques de la science spatiale, et des constantes de temps des projets susceptibles de les utiliser, on privilégiera la production de composants via les centrales technologiques nationales clairement identifiées, tout en maintenant une veille sur les composants disponibles sur étagère. Toutefois, l'effort est à concentrer sur des technologies pour lesquelles la France dispose d'une expertise à l'état de l'art international et où la concurrence est limitée.**

**Les filières de composants offrant des synergies sol-espace sont à privilégier pour les applications à caractère scientifique en particulier.**

### 3.4.3. Coordinations inter-organismes

Pour la détection dans l'IR et le visible, on s'appuie principalement sur des moyens industriels lourds (Lynred, ST Microelectronics) qui nécessitent un niveau d'investissement que le spatial seul n'est pas en mesure de soutenir. **Il est indispensable de renforcer une coordination des organismes nationaux pour fédérer les efforts budgétaires de développement de détecteurs.**

Pour les programmes nationaux ou à caractère opérationnel européens (Copernicus), on privilégiera une solution nationale ou Européenne : Lynred, ST Microelectronics avec des conceptions maîtrisées au niveau français pour la performance et le durcissement. Pour des missions à caractère plus scientifique et sous réserve de non disponibilité d'équivalents au niveau national, on pourra mettre en œuvre des détecteurs développés à l'étranger.

## 3.5. Optique

Dans le domaine optique, des développements ont été engagés depuis quelques années pour accroître la maturité de certaines briques technologiques présentant un potentiel important d'amélioration de la performance, de la fiabilité ou de la compacité des nouvelles générations d'instruments. Il faut poursuivre cet effort.

### 3.5.1. Free form

Les optiques « free form » offrent la possibilité de réaliser des combinaisons optiques plus compactes mais également plus complexes. Elles ont déjà fait leur apparition dans certains concepts instrumentaux spatiaux en cours de développement au CNES mais également dans d'autres agences. Cependant certains progrès doivent être réalisés pour tirer pleinement profit de ces technologies :

- Amélioration des outils de conception (simulation optique sur système complexe),
- Moyens de réalisation et de duplication à développer / améliorer,
- Méthodes de caractérisation à consolider,
- Coopération industrie – laboratoire à renforcer.

### 3.5.2. Lidar : favoriser la simplification et la fiabilisation de ces instruments

Le développement des lidars spatiaux, constitue toujours un défi technique bien que plusieurs instruments spatiaux soient déjà en opération. Les retours d'expérience pointent le besoin de solutions alternatives afin notamment d'améliorer la fiabilité de certaines briques et dé-contraindre les exigences de performances de différents sous-ensembles : sources laser, détection, peignes de fréquence, filtrage du fond, ...

<sup>9</sup> Extremely Large Telescope

### 3.5.3. Poursuivre les développements autour de l'imagerie à très haut contraste

Les futures générations de télescopes spatiaux, notamment pour la caractérisation des atmosphères des exoplanètes, nécessiteront des techniques d'imagerie à très haut contraste. La France pionnière dans ce domaine, dispose d'une expertise à l'état de l'art s'appuyant sur une activité de recherche coordonnée de plusieurs laboratoires scientifiques. Il faut poursuivre l'accompagnement de cette dynamique, notamment sur les domaines suivants :

- Optique adaptative haut contraste (senseur et correcteur de front d'onde),
- Détection à haute dynamique,
- Méthodes coronographiques,
- Traitement du signal,
- Composants optiques à très haute qualité de surface,
- Techniques de couplage haut contraste / haute résolution spectrale.

### 3.5.4. Photonique

Le CNES a permis il y a deux décades l'émergence de la R&D en astrophotonique pour l'interférométrie optique multi-télescopes. Cette technologie qui permet une très forte intégration de fonctions sur une même puce optique éventuellement associée à des fonctions de filtrage a bénéficié à deux instruments majeurs sols au VLTI<sup>10</sup> : PIONIER (2010) et GRAVITY (2016). Ces succès ont mené récemment à l'utilisation de circuits photoniques pour l'imagerie par redistribution de pupille dans les télescopes simples. D'autres développements ont conduit à la réalisation de systèmes similaires pour la spectroscopie. Le TRL et le mise en œuvre (interface notamment) pour un contexte spatial restent à consolider mais le potentiel pour le haut contraste ou la simplification/compacité des instruments mérite d'être suivi, en considérant par exemple :

- La photonique moyen infrarouge,
- L'émergence de la photonique 3D,
- L'intégration système multifonctions, notamment fonctions actives (modulateur de phase par exemple).

## 3.6. Technologie pour Essaim et instrument

### 3.6.1. L'approche NanoSatellite

L'approche NanoSat rend accessible la programmation de missions multi-satellites : constellations, essais, satellite mère-filles, qui sont des concepts pouvant offrir les observations requises pour une science originale. Au-delà de l'impact sur le coût, ces concepts mission peuvent apporter de nouvelles approches système, de la réactivité, et aussi un gain de performance et de la résilience.

Certaines fonctionnalités sont alors requises pour leur faisabilité :

- Commande/contrôle du système en essaim et autonomie,
- Liaison inter-satellite (ISL) et protocoles réseau à fortes contraintes opérationnelles,
- Échanges de données et/ou traitements distribués,
- Localisation et connaissance de la géométrie relative de la formation,
- Horloge distribuée sur l'ensemble de l'essaim,
- Dynamique orbitale collective (par exemple maintien de la formation, anticollision).

En fonction des objectifs de la mission tout ou partie de ces techniques seront nécessaires avec des niveaux de performances variables, (par exemple dépendant de la longueur d'onde d'observation).

### 3.6.2. Les opportunités et les enjeux

Les principales opportunités concernent d'une part la miniaturisation favorisée par l'exploitation de technologies développées pour d'autres secteurs d'activités et leur spatialisation, et d'autre part la disponibilité de calculateurs spatiaux et COTS<sup>11</sup> augmentant énormément les capacités de traitement bord et de mémoire disponible.

Les principaux enjeux quant à eux, relèvent de **la réalisation de petites/moyennes séries et de l'inter-calibration des paramètres constitutifs de la performance, aussi bien instrumentaux, que satellite ou système, conduisant à établir une physique de la mesure à l'échelle de l'essaim.**

<sup>10</sup> Very Large Telescope Interferometer

<sup>11</sup> Commercial Off The Shelf



## 3.7. Traitement à bord

### 3.7.1. Capacités de calcul et mémoire bord

Les calculateurs spatiaux, pour plateforme ou charge utile, connaissent actuellement une révolution sans précédent. De nouveaux composants durcis aux radiations permettront à court terme de multiplier les capacités de traitement par un facteur 20 à 40 et ainsi autorisent des traitements à bord plus complexes.

Ces nouveaux processeurs, basés sur des cœurs ARM, ainsi que de nouveaux composants programmables européens de type FPGA<sup>12</sup> offriront dès 2020 des capacités de traitements démultipliées.

Pour les missions où le coût est un critère essentiel (nanosatellites), les méthodes de qualification et les techniques de mitigation logicielles et matérielles des composants « industriels » COTS permettent d'envisager leur utilisation pour des missions spatiales et d'offrir des capacités d'un ordre de grandeur encore supérieur au prix d'une perte de disponibilité maîtrisée.

Le stockage à bord ne devrait plus être un facteur limitant avec des capacités de plusieurs Tbits et des débits en entrées/sorties de plusieurs Gbits/s. Notons également que les liaisons numériques rapides de nouvelle génération permettront des échanges inter-équipements jusqu'à 10 Gbits/s.

Cette puissance de calcul accrue couplée à un hyperviseur logiciel gérant le partitionnement spatial et temporel de la ressource informatique permet déjà de développer des concepts avioniques très intégrés autorisant la co-localisation de plusieurs traitements sur un seul calculateur en apportant des gains substantiels en consommation et masse.

### 3.7.2. Autonomie et traitements avancés

Il existe de nombreuses recherches qui ont augmenté la maturité des algorithmes de perception artificielle, de compréhension des scènes, de planification et de décision voire d'extraction de causalités. A la base de ces fonctions améliorées, ce sont les algorithmes d'apprentissage « artificiel, ou machine ou encore automatique » qui ont poursuivi leur essor. On distinguera :

- L'apprentissage symbolique où les informations et les règles qui le structurent sont fournies directement par des experts sous des formes plus moins précises.
- L'apprentissage statistique où les connaissances sont à structurer ou difficiles à structurer et reposent simplement sur un échantillon d'exemples représentatifs de la relation recherchée. Plusieurs techniques algorithmiques sont exploitées pour construire un modèle « d'approximation » sans une connaissance explicite du domaine. Les plus utilisées sont les réseaux de neurones formels et les arbres de décision.

Dans le domaine de la commande et du contrôle, les travaux se sont poursuivis notamment sur la commande non linéaire robustifiée pour tenir compte de comportements non linéaires comme le ballonnement d'ergols liquides dans les réservoirs, ou encore le pilotage de systèmes orbitaux redondants.

Ces traitements peuvent être utilisés plus ou moins profondément dans la conception de la mission spatiale, de sa préparation (e.g. extraction d'une FTM instrument) jusqu'à la gestion routinière de la mission elle-même (calibration voire inter-calibration, traitement de données, contrôle/commande), du « back-end » instrument jusqu'aux traitements bord sans parler de leurs apports aux traitements réalisés au sol (éventuellement a posteriori).

Notons également que l'autonomie de décision et des traitements bord avancés sont incontournables pour certains concepts mission tel que le vol en essaim ou celui d'un instrument réparti sur plusieurs satellites.

### 3.7.3. Opportunités et enjeux

La convergence actuelle de l'augmentation des capacités de calcul bord, du stockage mémoire et de la disponibilité de traitements avancés offrent de nouvelles opportunités aux concepteurs de missions spatiales scientifiques telles que :

- Accroissement de la réactivité de la mission aux informations perçues, en augmentant l'intelligence bord donc l'autonomie à différents niveaux : plate-forme, instrument, mission elle-même,
- Amélioration de la performance dans différentes phases de la mission : conception, déroulé, exploitation,
- Diminution du coût via la miniaturisation et la possible répartition de fonctions sur plusieurs nanosatellites.

Ces perspectives n'exonèrent pas des difficultés potentielles associées aux éléments suivants :

- Utilisation de capteurs spatialement et spectralement de plus en plus performants, fournissant donc des volumes toujours croissants de données,
- Maîtrise de l'interprétation des décisions prises en autonomie (notamment en apprentissage bord),
- Utilisation de communications inter-satellites dans le cas d'une mission multiplateformes,

<sup>12</sup> Field Programmable Gate Arrays

- Gestion de la perte d'informations (dans le cas où il est choisi de ne pas redescendre l'ensemble des données au sol) et impossibilité de bénéficier d'un possible incrément de traitement au sol,
- Gestion de la défaillance d'un des composants dans un système multivecteurs.

Pour le concepteur de missions spatiales scientifiques, la rupture dans ce domaine ne se situe donc pas forcément au seul emploi de technologies (capacité de calcul, mémoire bord et traitements) qui ont progressé. La rupture doit se faire aussi en exploitant ces technologies pour changer radicalement les compromis système traditionnellement appliqués :

- Nouvelle répartition des traitements entre bord et sol → plus d'intelligence à bord, donc plus d'autonomie,
- Nouvelle répartition des traitements entre satellites d'un essaim ou d'un vol en formation → vers une intelligence répartie,
- Apprentissage en cours de mission sur les données acquises (à bord ou au sol) → vers une agilité mission contrôlée.

**Cette rupture potentielle dans la conception des missions spatiales nécessite donc une appropriation de ce panorama matériel et logiciel. Pour cela, les concepteurs peuvent s'appuyer sur les outils génériques développés par le CNES : calculateurs, logiciel de vol générique, superviseur logiciel, méthodologie d'évaluation de qualification et techniques de « mitigation » pour composant COTS etc...**

### 3.8. Concepts instrumentaux incluant calibration

#### 3.8.1. Tendances observées

Dans les domaines de l'instrumentation optique et micro-ondes plusieurs tendances se dessinent :

- La conception de missions permettant l'obtention de nouvelles observables (grandeurs géophysiques originales) ou quête de la sensibilité et de la résolution ultimes. Elles nécessitent le développement et la mise en œuvre de technologies complexes et coûteuses (grands télescopes, optique active, lasers, antennes déployables, métrologie spécifique interne à l'instrument) pour des missions basées sur des satellites relativement lourds (pour l'astronomie JWST, Euclid, Athena, Lisa et pour l'observation de la Terre Swot, Skim, missions Lidars...). Pour ces missions à caractère scientifique et à l'état de l'art, la durée de développement et les coûts s'accroissent, les missions "plus faciles" ayant déjà été réalisées.
- La conception de versions simplifiées et/ou miniaturisées de capteurs déjà éprouvés pour augmenter la densités spatio-temporelle des mesures compatibles de plus petites plateformes (gamme nanosat à microsat). Elle peut bénéficier assez directement des réductions de coût (PF et lancement) amenées par le NewSpace, dans des domaines assez variés : observation de la Terre (imagerie à forte revisite), radiooccultation GNSS<sup>13</sup>, nanomagsat, missions SHM<sup>14</sup>, exploration planétaire avec nanosats compagnons...

Pour l'optimisation de ce type de mission, un des éléments clés est la capacité à relâcher la contrainte au niveau instrument unitaire tout en s'assurant que la mesure produite va amener de l'information nécessaire pour l'amélioration de la performance du "grand système" (vérification nécessaire via la réalisation d'OSSE<sup>15</sup> pour application météo par exemple).

Simplification et miniaturisation des instruments passent par un relâchement de certaines spécifications de performance (par exemple mesures considérées comme "compléments intelligents" aux autres capteurs des missions opérationnelles). Elles imposent aussi la revisite des concepts instrumentaux et des technologies utilisées (optiques free-form, photonique, réintégration des marges de dimensionnement via approche multi-métiers, optimisation plans focaux, antennes, ampli faible bruit...). Les « back-ends » instrumentaux (acquisition, traitement, compression) bénéficient directement des progrès accomplis dans le domaine grand public notamment sur la puissance de calcul embarqué avec des compacités et consommations en baisse.

- La conception d'instrumentation réparti sur plusieurs satellites avec des exigences de contrôle et/ou de synchronisation entre satellites volant en formation (Noire, ULID, Lisa, Grice ...). La performance accessible par la configuration de l'essaim impose la connaissance précise de la position des satellites et une capacité à « synchroniser » très précisément les mesures pour en exploiter les différences de phase. Plusieurs options sont à examiner suivant les précisions recherchées (optique/micro-ondes) et le contexte orbital. Il est également nécessaire d'identifier les besoins d'échanges de données/mesures entre les satellites de l'essaim pour garantir la capacité à former la mesure de l'instrument réparti (ex : ensemble des fonctions de visibilité dans le cas de la synthèse d'ouverture micro-onde).
- Face à l'apparition de composants / processeurs bord offrant des puissances de calcul fortement accrue, il convient de poursuivre l'exploration de ce potentiel pour le calcul à bord : réactivité pour optimisation de

<sup>13</sup> Global Navigation Satellite System

<sup>14</sup> Soleil, Héliosphère, Magnétosphères

<sup>15</sup> Observing System Simulation Experiments

la prise de vue (détection de nuages), compression bord intelligente, reconnaissance d'objets... via des simulations d'ensemble voire de la démonstration en vol (satellites, ballon, avions, drones).

### 3.8.2. Enjeux technologiques

Autour de ces diverses tendances, un certain nombre d'enjeux technologiques et démarches apparaissent et il convient d'amplifier leur prise en compte :

- **Disposer de simulateurs de performances de la chaîne de mesure (mono ou multi-satellites) assez tôt dans le cycle de conception pour décloisonner les métiers et optimiser les spécifications.**
- **Disposer de ressources financières et humaines pour le développement de prototypes fonctionnels (projet exploratoire) d'instruments ou sous-systèmes,** favorisant l'usage de technologies disruptives/innovantes et assurant simultanément une montée de la maturité système. Une démonstration vol (techno et/ou système) peut s'avérer opportune pour certains concepts.
- **Revisiter la démarche de conception / réalisation / test** (Fabrication additive, ingénierie concourante, numérisation, IA, instruments répartis...) en s'appuyant tant que faire se peut sur des technologies disponibles spatialisables/spécialisées. A ce titre, l'ingénierie système basée modèles (MBSE<sup>16</sup>) se généralise et apporte une nouvelle approche en se focalisant sur l'utilisation et l'échange de modèles comme vecteur d'information. Cette approche présente de nombreux avantages comme la gestion des transitions entre les niveaux d'ingénierie (ex : Système, chaîne fonctionnelle, équipement) ou la traçabilité des exigences, les liens entre exigences et avec les solutions techniques. Elle optimise également les phases de conception préliminaire, notamment dans leur durée en favorisant un travail plus interactif des intervenants de différents métiers.
- **Adresser la problématique de la fabrication de petites séries d'instruments pour les constellations ou les essais,** notamment quant à l'organisation de leur réalisation.
- **Renforcer et standardiser les moyens de caractérisation / validation de composants standard (COTS, petites séries, ...) au sein des laboratoires scientifiques en s'appuyant sur l'expertise du CNES.**
- **Assurer l'étalonnage de la mesure :**
  - L'utilisation de prototypes fonctionnels des chaînes de mesure doit permettre d'identifier suffisamment tôt les besoins de métrologie spécifique et d'étalonnage.
  - Pour que les mesures complémentaires amenées par les missions « low-cost » soient utiles et correctement exploitées il est indispensable de connaître avec précision les fonctions de transfert instrumentales (précisions, biais instrumentaux liés à l'environnement, étalonnages radiométriques spécifiques...).
  - Étalonner les briques de base, éventuellement sur des moyennes séries (composants, sous-systèmes) et identifier les besoins spécifiques liés à l'inter-étalonnage entre capteurs, notamment pour les constellations.

### 3.9. Priorités R&D TOSCA et CERES

Les retours des groupes thématiques précisent certains axes de développement qui ont fait ou font l'objet de travaux de R&T. Il ne ressort pas de ligne de force particulière ce qui est logique compte tenu du spectre d'observables à considérer nécessitant un nombre varié de technologies à développer, sans qu'un besoin particulier ne puisse être mis en exergue, si ce n'est l'accélération du besoin de miniaturisation des instruments. Les axes de travaux proposés seront communiqués aux services techniques du CNES pour favoriser leur prise en compte dans le programme R&T/démonstrateur du CNES et seront considérés par les comités de sélection du CNES comme des sujets de fort intérêt pour les thématiques scientifiques.

### 3.10. Techniques de traitements sol et archivage des données

Concernant les techniques liées aux traitements massifs des données et aux architectures qui leur sont associées, il n'apparaît pas particulièrement le besoin de mener des développements technologiques spécifiques pour le spatial, mais plutôt la nécessité d'une appropriation des méthodes et outils mis en œuvre dans le monde du numérique et une adaptation de ceux-ci aux problématiques de la donnée spatiale afin de favoriser son exploitation aussi bien pour les besoins scientifiques que sociétaux. La R&T, comme par le passé, peut contribuer à cette appropriation, mais les enjeux autour de la valorisation de la donnée, qui vont bien au-delà du secteur spatial, nécessitent un effort beaucoup plus conséquent au niveau national et même européen. En effet, il convient de disposer d'infrastructures pérennes et indépendantes permettant le traitement et l'archivage de ces données qui constituent un patrimoine scientifique et sociétal. Rappelons que la France et l'Europe ont fortement investi pour la mise en place d'infrastructures spatiales à l'état de l'art mondial qui représentent également une source de développement économique considérable.

<sup>16</sup> Model-Based Systems Engineering

## 4. Recommandations du groupe

Une R&T plus « ambitieuse » :

**Recom 1 :** La R&T doit constituer une priorité dans la stratégie du CNES et des laboratoires scientifiques. Le CNES doit y consacrer un budget compatible des ambitions nationales. Les laboratoires et le CNES doivent maintenir un niveau de ressources humaines pérenne sur la préparation du futur, niveau ne devant pas fluctuer significativement au gré des contraintes projets.

**Recom 2 :** Accompagner la montée en maturité au niveau système instrument des concepts de mesures originaux et innovants en réalisant des prototypes fonctionnels (démonstrateurs). Envisager une démonstration vol (technologique ou système) lorsque la démonstration de la performance ne peut pas être faite au sol.

Autour de l'accès aux plateformes de micro-technologies et de la disponibilité de filières de détecteur :

**Recom 3 :** Accompagner la valorisation de l'expertise des centrales technologiques académiques pour une meilleure intégration des micro-technologies dans les instruments.

- Faciliter l'accès aux centrales technologiques académiques par un renforcement des liens entre les instituts INSIS et INP du CNRS et les concepteurs d'instruments spatiaux (CNES, CNRS-INSU, CEA, ...).
- Soutenir la mise en place avec l'appui de RENATECH, ou d'une autre infrastructure, d'une capacité pérenne d'intégration/encapsulation des micro-technologies qui soit compatible des exigences du spatial.

**Recom 4 :** Par un renforcement de la coordination des organismes nationaux, accompagner en anticipation des futurs projets, l'émergence de filières technologiques stabilisées ou maîtrisées, répondant aux besoins de la détection scientifique notamment dans le domaine de l'infrarouge (SWIR ou thermique). Dans certains cas, comme par exemple l'astronomie, la technologie peut couvrir les besoins sol et espace, offrant ainsi des perspectives de volumes significatifs et réguliers par rapport aux besoins spatiaux.

Autour de la miniaturisation et des petites plateformes :

**Recom 5 :** Investir dans la miniaturisation des instruments tout en garantissant un niveau de performances conforme aux enjeux scientifiques de façon à maximiser les opportunités d'emport.

Cette recommandation inclut la prise en compte des contraintes accrues par les dimensions réduites des plateformes sur les composants (EMC<sup>17</sup>, thermique, radiations, systèmes de déploiement, ...).

**Recom 6 :** L'émergence de nouvelles techniques d'ingénierie, basées sur l'utilisation de technologies favorisant l'intégration, la fonctionnalisation et la numérisation, nécessite un accompagnement par la formation (TTVS<sup>18</sup>, Action Nationale de Formation CNRS-INSU et CNRS-MITI) et par la mise en réseau (COMET<sup>19</sup>, réseaux spécifique CNRS-INSU) mais également par l'expérimentation via le développement de prototypes fonctionnels (démonstrateurs).

On s'attachera particulièrement à :

- Introduire de nouvelles méthodes de conception multi-métiers et outils associés en s'appuyant si nécessaire sur les expertises du CNES, ou de certains Centre Spatiaux Universitaires,
- Assurer une veille auprès des centres de recherche académiques et industriels menant des réflexions et des expérimentations sur ces nouvelles méthodologies en vue de les expérimenter dans les équipes de développement,
- Exploiter le potentiel de la fabrication additive 3D et 4D, en s'appuyant sur des centres d'expertise et de production du domaine. Il sera utile de viser à terme une « labellisation spatiale » de tels centres.
- Développer l'autonomie des satellites et des instruments, en tirant parti de l'accroissement des capacités des calculateurs bord et de la mémoire embarquée (gestion de l'énergie, stratégie de communication, choix automatique de modes d'observation, traitement de données et intelligence à bord).

**Recom 7 :** Investir dans la physique de la mesure basée sur une approche système (multi-capteurs / instruments répartis) pour anticiper les opportunités de flottes de petites plateformes (essaims, constellations, vaisseaux mère/filles). L'inter-calibration des différents paramètres entrant dans la performance globale du système nécessitera une vigilance particulière.

**Recom 8 :** Conduire une réflexion sur l'organisation à privilégier au sein des laboratoires et/ou dans l'industrie pour la réalisation de petites séries.

<sup>17</sup> ElectroMagnetic Compatibility

<sup>18</sup> Cours CNES de Techniques et Technologies des Véhicules Spatiaux

<sup>19</sup> COMMunautés d'EXperTs

## ANNEXE

### **Composition du groupe de travail :**

#### Coordination :

Pierre Kern (Directeur Technique CNRS-INSU),  
Pierre-Gilles Tizien (Responsable R&T CNES)

#### Participants :

Thérèse Donath (Directrice Adjointe à la Direction Technique et des Programmes ONERA),  
Cécile Langlade (Directrice du Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux, les Procédés et les Surfaces LICB),  
Isabelle Sagnes (Directrice de recherche au CNRS, chargée de mission Photonique et Nanotechnologies à l'INSIS),  
JP. Berger (Chercheur IPAG et en charge du Groupe E "R&D pour les moyens du futur" de la prospective INSU A&A),  
B. Cugny (Sous-directeur Adjoint Systèmes Instrumentaux CNES),  
Eric Defer (Chargée de recherche CNRS au Laboratoire d'Aérodynamique),  
Pierre- Emmanuel Martinez (Chargé de mission sous-direction Technique Bord CNES),  
Francis Presseccq (Chef du service Laboratoire et Expertise sous-direction Assurance Qualité CNES).

#### **Personnes consultées :**

Marc Ferrari (Astronome - Responsable R&D, Plateformes Technologiques, Relations Industrielles LAM-CNRS)  
Christophe Laporte (Sous-directeur Adjoint Radio-Fréquences CNES)  
André Laurens (Expert Plateau d'Architecture des Systèmes Orbitaux CNES)  
Luc Lefebvre (Responsable R&T CNES)  
Olivier Puig (Responsable R&T CNES)