

GROUPE DE TRAVAIL TRANSVERSE **« Science et Observations** **dans le contexte du Newspace et des Nano-satellites »**

Membres du groupe : N. Aghanim (IAS), J. P. Berger (IPAG), Denis Blumstein (LEGOS), P. Bousquet (CNES), C. Calleya (CNES), C. Crevoisier (LMD), E. Dartois (IAS), Ch. Delaroche (CNES), L. Dusseau (CSUM), M. Faup (co-président, CNES), M. Ferrari (LAM), R. Garcia (ISAE), M. Giard (co-président, INSU), H. Halloin (APC), J. M. Hameury (CERES), D. Hestroffer (IMCCE), L. Hubert-Moy (TOSCA), Etienne Lecoarer (IPAG), G. Hulot (IPGP), P. Kern (INSU), S. Lacour (LESIA), J. Lambin (CNES), A. Laurens (CNES), L. Lefebvre (CNES), M. J. Lefevre (CNES), M. Kretzschmar (LPC2E), J. F. Mahfouf (CNRM), A. Marchaudon (IRAP), J. Marques (IAS), J.L. Monin (CNES), F. Montmessin (LATMOS), L. Polidori (CESBIO), B. Rosier (ONERA), F. Seyler (IRD), Ch. Sirmain (CNES), J.C. Souyris (CNES), P. G. Tizien (CNES), L. Vigroux (Ministère).

1. Méthodologie

Ce groupe de travail mis en place par le CNES et le CNRS-INSU a rassemblé trois types d'expertises complémentaires : expertise scientifique (membres de chacun des groupes de travail thématique), expertise nano-satellite et charges utiles miniaturisées (membres de chacun des CSU et CSE ayant un lien avec la communauté scientifique) et expertise en construction et opérations spatiales (ingénieurs du CNES). Nous avons mené nos travaux de septembre 2018 à juin 2019, période pendant laquelle nous nous sommes réunis cinq fois en séance plénière. Pour alimenter notre réflexion nous nous sommes appuyés sur notre propre expertise ainsi que sur les contributions de la communauté scientifique : 36 contributions reliées à notre sujet dont environ 24 propositions de missions (sur un total d'environ 220 contributions à cet exercice de prospective). Enfin, pour une meilleure compréhension des intérêts et enjeux industriels, nous avons auditionné un grand constructeur spatial et une startup du Newspace. Sur la même question, nous avons aussi eu accès à une cartographie du paysage européen des constructions nano-satellites commandée par le CNES à un cabinet privé.

Certaines activités du groupe ont donné lieu à la mise en place de sous-groupes dédiés : bilan scientifique nano-satellites, état des lieux – état de l'art et analyse technique, centres spatiaux universitaires et étudiants. L'analyse scientifique des missions proposées, et leur mise en priorité éventuelle, ont été faites indépendamment par les groupes de travail thématiques compétents, dans le cadre du CERES et du TOSCA. Nous avons bénéficié par ailleurs des recommandations du groupe OFRAME (Organisation Française de Recherche Appliquée en Météorologie de l'Espace) qui a ainsi manifesté un fort intérêt prospectif pour le déploiement de constellations de petits satellites.

2. Contexte et dynamique

Au tournant du siècle, deux mouvements distincts prennent corps aux USA : le « Newspace » et ce qui deviendra bientôt une dynamique mondiale de nano-satellites.

Le Newspace correspond à une stratégie de « cyber dominance » et de « space dominance » qui s'appuie sur une coopération étroite entre entités institutionnelles, universitaires, scientifiques et privées. La démarche consiste à :

- Réduire les coûts d'accès à l'espace et l'exploration spatiale,
- Favoriser le développement de petits satellites et l'innovation,
- Elargir le marché (NASA, Commercial, Défense) en réduisant la place des acteurs hors USA,
- S'appuyer sur Internet et le numérique pour bénéficier des technologies et des processus de développement,
- « Verticaliser » le secteur à travers les GAFAs (leurs données et leurs réseaux).

Approximativement à la même période, en 1999, l'Université Polytechnique de Californie et l'Université de Stanford créent un standard pour permettre à leurs étudiants de concevoir et développer à moindre coût des satellites de 1 à 10 kg dans la perspective de leur mise en orbite. Rapidement, le standard, qui donne une définition précise des caractéristiques que les développeurs doivent satisfaire avant le lancement, est adopté au niveau mondial. Un écosystème mondial, à la croisée entre enseignement, laboratoire et industrie, voit le

jour. Plus qu'une filière, c'est un esprit qui se généralise : développement incrémental, recours aux technologies issues de secteurs terrestres où elles ont déjà été durcies, prise en compte des apports de chacun pour bénéficier d'une dynamique collective.

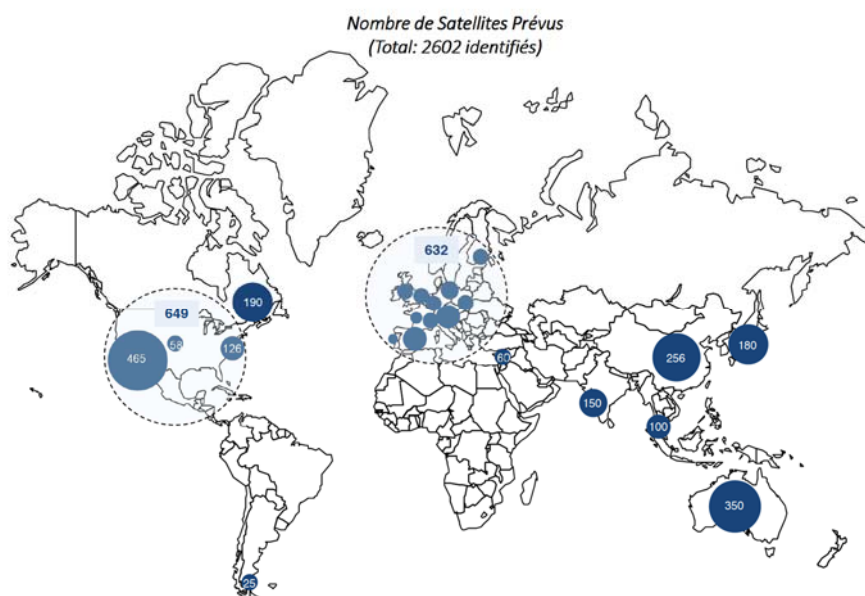
La dynamique foisonnante qui caractérise le secteur spatial actuel est l'aboutissement de ces deux mouvements qui se fertilisent après 20 ans de mise en œuvre et voient l'arrivée de nouveaux acteurs, entrepreneurs souvent issus ou en lien avec le monde de l'économie numérique, qui développent des produits spatiaux en dehors des circuits historiques et mobilisent des investissements majoritairement privés (estimés à 4 Md\$ pour l'année 2017). Cette mutation est rendue possible grâce à du transfert de personnels, de technologies et de savoir-faire des partenaires institutionnels historiques, à des promesses d'achat de service ou de données, un nouvel élan économique autour du spatial, contribuant depuis l'orbite à l'appétit d'hyperconnectivité de nos sociétés modernes, avec des constellations d'observation ou de télécommunications quadrillant la planète depuis l'espace et une aspiration de la jeune génération à une action militante qui va de l'entrepreneuriat (floraison de start-up) au développement des logiciels, équipements en open source et même désormais à la science ouverte.

L'impact au niveau mondial est impressionnant :

- Foisonnement des acteurs privés qui voient aussi la science comme une part de marché potentielle et pourraient déstabiliser le domaine en faisant basculer d'un mode coopératif (coopérations autour de l'échange de données) à une économie de service où l'accès à la donnée brute ne serait plus garanti à tous ;
- Explosion du nombre de « projets smallsats » : on prédit 2500 satellites de moins de 50 kg lancés avant 2023. La gamme dépasse le domaine des nano-satellites pour englober les micro-satellites jusqu'à 200 kg. Ceux-ci bénéficient de l'effort d'industrialisation rendu possible par l'émergence des mégaconstellations et de l'héritage de technologies miniaturisées et déployables étudiées pour les cubesats (mises à l'échelle de satellites plus gros pour atteindre des performances annoncées impressionnantes) ;
- Mise en place d'un mode de développement et de déploiement incrémental : validation de concept à bas coût sur un satellite précurseur, montée en puissance sur un premier de série, amélioration progressive dans des systèmes orbitaux opérationnels qui deviennent de fait hétérogènes ;
- Miniaturisation des technologies (mettant à profit l'héritage des secteurs terrestres) ;
- Nouveaux concepts instrumentaux rendus envisageables : les charges utiles peuvent être éclatées sur plusieurs satellites réunis au sein d'un réseau pour accéder à une performance pertinente tout en restant sur des satellites de petite taille, la mesure physique peut être obtenue par le concours de systèmes à grand nombre de satellites pour augmenter la résolution temporelle ou spatiale de l'observation.



La Carte Mondiale des Projets de Constellation Nanosats



...mais l'Europe ne manque pas de projets pour rattraper son retard

Source: Recherche Paragon European Partners



- Figure 1 : Cartographie mondiale des projets de constellations Nanosats.

Dès lors une réflexion de prospective scientifique nationale doit prendre en compte les problématiques suivantes :

- Préserver l'accès aux données brutes et aux métadonnées permettant de les caractériser en terme de physique de la mesure (problématique de calibration et de connaissance des conditions de leur acquisition dans le cas d'apports multiples à une même mesure) ;
- Mettre à profit les ambitions des acteurs privés : héritage des technologies développées, accès à des fonds spéculatifs privés en complément des fonds publics ;
- Envisager la possibilité de missions de courte durée favorisant l'innovation à faible coût (utilisation de composants « sur étagère » : COTS) ;
- Repenser la stratégie de mesure pour tirer bénéfice de la miniaturisation des satellites et de leur coût modéré : mesure répartie sur plusieurs satellites (instrumentation fractionnée réduisant la complexité individuelle pour la reporter au niveau système, séparation des fonctionnalités dans des concepts de type mère-fille), coopération où un acteur apporte un satellite parmi N, augmentation de la résolution temporelle ou spatiale ;
- Contribuer à la dynamique technique d'ensemble : amélioration des performances des dispositifs miniaturisés, généralisation des dispositifs de déploiement, gestion de la complexité en intégrant l'intelligence artificielle et l'intelligence collective.

L'Europe est partie plus tard que l'Amérique, mais elle dispose d'ores et déjà d'un tissu actif d'acteurs privés et institutionnels (cf Figure 1 ci dessus) qui lui donne le potentiel de se développer dans ce secteur en fonction des initiatives à venir. En France, partant des acquis du programme pédagogique Janus, le CNES a d'abord soutenu l'émergence d'un écosystème nano-satellites à travers des actions de R&T sur des équipements pour passer ensuite au soutien à une filière industrielle (gamme 12U – 27 U) à travers le projet Angels et bientôt à une filière industrielle (3U) à travers le projet N3SS.

3. Bilan scientifique des nano-satellites

Le bilan scientifique est essentiellement composé de résultats scientifiques novateurs impliquant des nano-satellites et de preuve de faisabilité en vol d'instruments embarqués sur de telles plateformes, impliquant la prise en compte du possible déploiement de bras ou d'antennes, la stabilisation et le contrôle d'attitude, la communication avec le sol et la redescende des données. La première catégorie requiert que l'ensemble des conditions listées dans la deuxième soit au moins partiellement validé et reste à ce jour encore relativement limité dans tous les domaines d'observation de la Terre et de l'Univers, à l'exception notable des domaines SHM et Atmosphère.

Astronomie et Physique Fondamentale

Aucun résultat scientifique de premier plan n'est à noter pour l'instant. Côté Astronomie, seule la constellation internationale de 6 nano-satellites BRITe a permis d'obtenir des données d'oscillations de luminosité d'étoiles massives. Le concept d'essaim rend accessibles les architectures d'instruments répartis et l'interférométrie, très prometteurs pour la radioastronomie basses fréquences. Si quelques rares projets sont proposés, ils en sont, pour la plupart, toujours à l'état de concepts instrumentaux (exemple : design d'imageur UV). Côté Physique Fondamentale, les exigences en termes de métrologie peuvent être un frein important pour un recours à la technologie nano-satellites (la gamme des microsats, comme Microscope, paraît ainsi plus adaptée).

Planétologie et Exoplanètes (exploration planétaire, météores, micro-gravité)

Il n'y a pas encore de résultat majeur à noter, mais l'utilisation de nano-satellites est récente et en pleine évolution avec des objectifs scientifiques bien identifiés, passant souvent par un besoin de démonstration technologique préalable. Plus généralement, on peut considérer quatre classes de missions selon le type de destination : i) orbite terrestre (LEO essentiellement), ii) orbite lunaire, iii) planètes proches (Mars, Venus) et astéroïdes géocroiseurs accessibles à des cubesats stand-alone, et iv) deep-space « plus lointain » (essentiellement réservé à des schémas mère - fille). Les développements actuels en orbite LEO concernent surtout la détection de transit d'exoplanètes. Deux missions ont été lancées, PicSat (France, Beta Pictoris b) et ASTERIA (USA, 55 Canc). Si PicSat n'a pas donné de résultat scientifique, ni atteint ses objectifs technologiques, la mission ASTERIA a atteint ses objectifs de démonstration technologique, sa durée de vie nominale et a observé un transit. Plusieurs projets sont en cours de réalisation pour des missions en orbite lunaire et un lancement important est prévu en juin 2020 avec EM-1 où 13 cubesats indépendants seront déployés autour de la Lune. Enfin, quelques missions de nano-satellites interplanétaires sont aussi à l'étude en stand-alone, ou en accompagnement de missions déjà acceptées (programme NASA Discovery). On peut particulièrement noter le succès de croisière jusqu'à Mars des nanosatellites MarCO. L'utilisation de 15

auxiliaires déployables actifs ou passifs (rovers, impacteurs, cibles pour le prélèvement d'échantillons, caméra free-flyer...) pendant la mission Hayabusa 2 en cours est aussi assez remarquable.

Soleil-Héliosphère-Magnétosphère

Les résultats scientifiques intéressants se situent soit dans l'observation du rayonnement solaire, soit dans l'étude des ceintures de radiation dans la magnétosphère interne et proviennent de nano-satellites quasiment tous d'origine américaine et en orbite LEO. Pour l'étude du Soleil, deux nano-satellites, NorSat-1 et CSIM, sont dédiés à la mesure de l'irradiance solaire totale et fonctionnent de manière satisfaisante même si aucun résultat n'a pour l'instant été publié. Deux autres, MinXSS-1 et -2 ont effectué des mesures d'irradiance spectrale dans le domaine des rayons X afin de mieux caractériser les éruptions solaires. Des résultats notables ont aussi été obtenus dans les ceintures de radiation avec les missions CSSWE, FIREBIRD2 et ELFIN-A. Quelques résultats marquants ont été obtenus sur les propriétés, la structure spatio-temporelle et l'origine des microburst d'électrons dans les ceintures de radiations avec la paire de nanosatellites FIREBIRD2 et sur l'origine par mécanisme de CRAND et la limite supérieure en énergie des électrons de la ceinture de radiation interne avec CSSWE (qui a fait l'objet d'une publication dans *Nature*). Une large partie de ces résultats a été cependant obtenue grâce à l'utilisation conjointe de données d'autres instruments scientifiques (satellites comme Van Allen Probes, ballons comme BARREL ou même nanosatellite privé Aerocube-6), ouvrant la voie vers l'utilisation d'essaim de nanosatellites pour assurer une bonne couverture spatio-temporelle depuis l'espace des phénomènes étudiés. Du côté de l'ionosphère, les concepts instrumentaux généralement plus complexes à miniaturiser, le besoin de bonnes stabilisation et restitution d'attitude ou le déploiement de bras rendent nécessaires des validations en vol poussées des instruments, en comparant par exemple les résultats à des modèles éprouvés (champ magnétique ou densité électronique). On peut citer dans cette catégorie les missions DICE bi-satellites, CINEMA, Hoopoe et ExoCube, leurs succès permettent d'envisager l'utilisation de tels instruments aussi dans la magnétosphère externe ou le vent solaire. Le seul résultat notable dans le domaine ionosphère est la caractérisation des propriétés des irrégularités ionosphériques dans le cadre de la mission RAX-2 où les pulses émis par des radars incohérents au sol sont captés à bord à l'aide d'un récepteur radio dans la gamme UHF.

Atmosphère et Océan

Côté atmosphère, deux thématiques scientifiques principales ont pour l'instant émergé : la prévision numérique du temps (PNT) et le suivi des gaz à effet de serre (GES). Côté PNT, en parallèle au développement du programme COSMIC par la NASA, diverses entreprises se sont positionnées sur la fourniture de paramètres thermodynamiques de l'atmosphère à partir de données de radio-occultation GPS, faisant ressortir la question de l'achat des données par les centres de PNT. La mission CYGNSS (cf Figure 2 ci-dessous) pour l'observation des cyclones tropicaux a proposé un concept de base très innovant, avec des produits « vent » intéressants mais à améliorer. Elle a aussi mis en évidence que l'intercalibration est un verrou pour l'utilisation opérationnelle de constellations de nano-satellites. Divers prototypes, embarquant des radars ou des radiomètres micro-ondes pour l'étude de l'évolution des nuages, ont été lancés courant 2018 : RainCube, TEMPEST-D, ou encore TROPICS et font l'objet d'un fort intérêt de la communauté. Côté GES, deux entreprises se sont positionnées sur la détection de fuite de méthane à partir de mini-satellites, tel GHGSat-D. Ces mesures, d'accès payant, ne sont encore que sporadiques et ne présentent pas une précision suffisante pour réaliser des estimations de flux. Côté Océan, il faut noter le lancement récent en décembre 2018 d'un premier nano-satellite de démonstration pour une mission essaim appelée SOCON et dédiée à la couleur de l'océan.

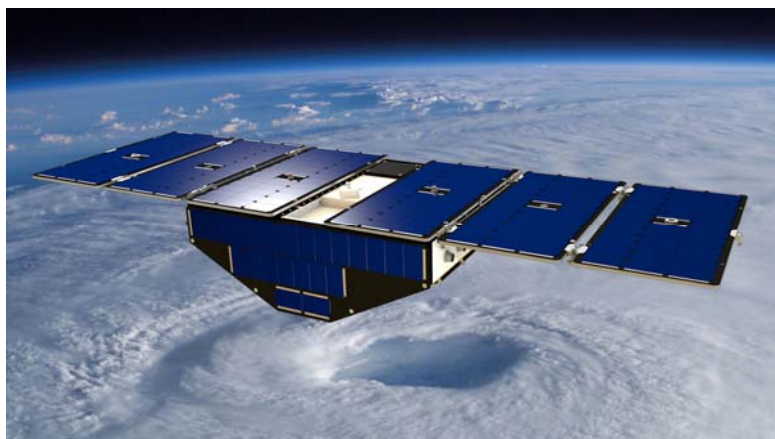


Figure 2 : vue d'artiste de l'un des huit satellites CYGNSS capables de cartographier la vitesse des vents au cœur des tempêtes tropicales par l'analyse de la diffusion des signaux GNSS sur la surface des océans. Cette constellation a été développée par l'Université du Michigan sous contrat NASA pour un coût total de l'ordre de 152 M\$.

En conclusion, les missions scientifiques utilisant des nano-satellites sont apparues au cours des dix dernières années mais elles sont encore peu nombreuses (moins d'une centaine, voir liste en Annexe 1). Elles ont

donné lieu à environ une centaine d'articles dont le plus grand nombre présente les développements techniques. Une vingtaine d'articles présente des résultats scientifiques, la moitié d'entre eux concernant la mission CYGNSS. Toutefois, la validation en vol de nombreux concepts instrumentaux ces 5 dernières années et le foisonnement d'idées novatrices dans quasiment tous les domaines des sciences de la Terre et de l'Univers, laissent envisager une future « explosion » de résultats, en particulier dans les domaines SHM et atmosphère. Cette impression est confortée par la longue liste de missions nano-satellites à vocation scientifique qui seront lancées dans les 3 prochaines années.

4. Etat des lieux technique des nanosatellites

4.1. Le paysage technique satellite et système

L'esprit initialisé par les universités au début des années 2000 a essaimé dans tout l'écosystème spatial. La combinaison de la dynamique NewSpace et de la miniaturisation des technologies (héritage des secteurs terrestres) est à l'origine d'un foisonnement des acteurs et des produits, avec pour résultat une offre pléthorique et en évolution permanente, ce qui rend l'établissement d'un catalogue impossible et inutile.

Pour les cas typiques¹, un éventail de solutions est disponible aujourd'hui en Europe : sous-systèmes et équipements (structure, SCAO, énergie, télécoms, avionique, propulsion), plateformes et intégrateurs, accès à l'espace (capacité lanceur et brokers). Des solutions avancées apparaissent (aux USA en particulier), auxquelles il serait possible de recourir si toutefois la question de l'indépendance européenne ne se posait pas. L'Annexe 2 rassemble les performances actuellement accessibles pour différents sous-systèmes nano-satellites.

Pour autant, un effort constant est à mener pour rendre possible des missions plus spécifiques, introduisant des contraintes instrumentales pointues (CEM, pointage ultra-fin), les missions en espace lointain (contraintes de durée de vie dues à la croisière, contraintes d'énergie, de température, de télécoms, de tenue aux radiations), l'accès aux orbites GEO ou HEO (mise à poste longue dans les ceintures de radiations), les cas d'orbites « rares » ou de constellations pouvant nécessiter un lancement dédié. Un effort particulier est à faire sur les dispositifs de déploiement (antennes, mâts, panneaux solaires, radiateurs...). Pour ces missions plus exigeantes, certaines solutions sont déjà disponibles aux Etats-Unis (exemple de l'antenne grand gain en bande X des cubesats MarCO du JPL qui ont relayé la descente d'Insight sur Mars), mais pas encore en Europe.

Une autre direction d'efforts doit résider dans la miniaturisation des charges utiles, pouvant nécessiter de changer le principe de mesure, une réduction homothétique risquant de modifier radicalement le domaine de mesure, la sensibilité ou la bande passante.

4.2. Les profils de mission

Au plan technique, le principal enjeu des nano-satellites est d'ouvrir la voie à de nouveaux concepts de mission, que l'on peut ranger dans trois classes :

Les démonstrations : preuves de concept, pour lesquelles les objectifs scientifiques passent au second plan, l'originalité ou l'innovation étant prioritaires sur la disponibilité ou la fiabilité : elles peuvent faire l'objet d'un développement rapide (typiquement 2 ans), avec une prise de risque assumée et une durée de vie potentiellement courte, liées à l'usage de COTS ou d'éléments standard permettant des économies d'échelle.

Les missions de type « compagnon » : passager secondaire venant en complément d'une mission principale, il s'agit d'une mission réduite en ambition ou en durée, comportant une prise de risque, et acceptant de rester au rang de mission secondaire pour ne pas « hériter » des spécifications ou des contraintes de la mission principale. En adoptant des solutions minimalistes, un concept satellite très simple ou des fonctions réduites, il devient possible de rester dans des budgets modestes (de l'ordre de la dizaine de M€). Cette classe est notamment rencontrée en accompagnement de missions en espace lointain. Elle se prête naturellement à des schémas de collaboration.

Les concepts porteurs d'une science originale : la petite taille permet de rendre la mission programmatiquement réaliste. Il s'agit de :

- Instrumentation fractionnée ou répartie, permettant de réduire la complexité individuelle, mais en reportant d'autres contraintes au niveau système ;
- Mesures multi-modes, multipoints, concepts mère + filles ;

¹ Missions en LEO, inclinaisons et heures locales classiques, sans contraintes spécifiques

- Constellations, pour lesquelles il s'agit d'échanger de la fiabilité/durée de vie individuelle contre de la robustesse au niveau système (résilience), de la performance individuelle contre l'amélioration de paramètres système (revisite, densité du maillage spatial ou temporel de la mesure).

Même s'il ne s'agit plus de missions « low cost », la science (ou l'application) étant au premier plan avec de forts enjeux et une exigence de performance, il est à noter que ces concepts permettent la coopération d'acteurs multiples (ex : par apport d'un satellite parmi N), et des stratégies de développement ou de déploiement incrémental.

Ces différents concepts induisent des directions de travail :

- sur les échelles de temps : cibler des durées de développement de 0,5 à 2 ans, durée de vie de 2 à 5 ans puis à 7 ans ;
- sur les organisations : fabrication en série, déploiement incrémental, prise en compte des enjeux sur les autres éléments du système (réseaux et antennes sol, segment sol & opérations, LOS, lancement) ;
- pour le développement de solutions et capacités à l'échelle du système : intercalibration, co-ingénierie science et système, « Swarm technologies » (réseau, échange de données et traitement distribué, localisation et connaissance de la géométrie de l'essaim, temps commun, dynamique orbitale collective).

4.3. Le paysage industriel

Les grands maîtres d'œuvre du spatial sont virtuellement absents de ce créneau, probablement parce que le chiffre d'affaires représenté par le marché des nano-satellites est trop petit en regard de leurs organisations, coûts de fonctionnement, objectifs de retour sur investissement et de rendement financier.

On se trouve donc en présence de deux types d'acteurs :

- des startups, le plus souvent créées spécifiquement sur le créneau des nano-satellites, positionnées en tant que « space mission provider² » et très visibles ;
- des PME du spatial traditionnel, plutôt positionnées en tant qu'équipementiers, et bien moins visibles.

Le « business model » des startups est très axé sur les constellations applicatives. Si ce marché se concrétise, on assistera à une probable croissance de l'offre. Dans tous les cas, l'écosystème va se sédimenter ouvrant la voie à une dynamique qui peut permettre à des PME issues du spatial traditionnel de se positionner.

5. Centre spatiaux universitaires et étudiants (CSU/CSE):

Environ la moitié des centres se situe en Ile de France, l'autre moitié se déployant au sud de la France de Nice à Toulouse, en passant par Grenoble, Marseille et Montpellier., Les centres spatiaux Universitaires ont tendance à s'appuyer sur les compétences techniques et scientifiques des laboratoires spatiaux, alors que ceux développés au sein des grandes écoles s'appuient souvent sur des startups et laboratoires technologiques. Ces centres spatiaux, dont une partie ne disposait pas de compétences « spatiales » auparavant, bénéficient aussi de fondations ou partenariats avec de grandes entreprises du spatial implantées à proximité. L'objectif principal de tous ces centres est pédagogique, avec aussi des objectifs de développement techniques et scientifiques pour cinq d'entre eux : CSUT (Toulouse), CSUG (Grenoble), CSUM (Montpellier), C2ERES (PSL) et le centre nano-satellites de l'Université de Paris (ex Université Paris Diderot).

Une partie non négligeable des CSU/CSE a développé ses propres compétences et s'affiche potentiellement comme un nouvel acteur du spatial. C'est notamment le cas du CSU de Montpellier, qui a déjà lancé trois nano-satellites (Robusta 1A, 1B et MTCUBE). Avec PICSAT (C2ERES), X-cubesat (Ecole Polytechnique) et AmicalSAT (CSUG), le nombre total de nano-satellites lancés par ces centres se monte à 6, sachant que deux lancements supplémentaires sont imminents : EntrySat développé par le CSUT est actuellement à bord de l'ISS pour une mise en orbite prochaine, EyeSat développé par le CNES sera lancé avant la fin de l'année 2019. Sur l'ensemble des centres environ 15 projets sont en développement et c'est un total de 9 nano-satellites, tous de taille inférieure ou égale à 3U, qui devrait être lancé d'ici fin 2020.

La plupart des centres spatiaux, à l'exception du C2RES de PSL, a bénéficié d'un soutien matériel et en terme d'expertise technique de la part du programme JANUS³ du CNES. Leurs ressources humaines sont

² Ce terme englobe toutes les activités nécessaires à mettre en service une mission spatiale, des études préliminaires aux opérations en vol, en passant par la maîtrise d'œuvre satellite et l'approvisionnement du service lancement, mais à l'exception du développement de la charge utile

toutefois relativement limitées vis-à-vis des besoins pour les futurs projets spatiaux scientifiques (un total d'environ 20 etp pour l'ensemble des personnels permanents impliqués dans les centres spatiaux) car dimensionnées et adaptées aux objectifs pédagogiques (encadrement d'environ 400 à 500 étudiants chaque année). Cette fragilité des ressources humaines rend problématique la pérennisation des compétences développées. Elle s'ajoute à des difficultés financières puisque, même si les coûts de construction et de lancement des nano-satellites sont réduits par rapport à ceux des constructions et opérations spatiales traditionnelles, ils sont largement au-delà des possibilités de financement des établissements en charge.

Par ailleurs, sur le plan scientifique, on observe qu'à l'exception du C2ERES et du centre spatial de l'Université de Paris qui bénéficient d'une forte dynamique scientifique du fait de leur intégration dans des laboratoires spatiaux (le LESIA pour le premier, l'IPGP et l'APC pour le deuxième), les choix de projet faits par les centres spatiaux pédagogiques sont souvent découplés des grandes questions scientifiques des communautés utilisatrices des mesures spatiales ou des défis technologiques associés.

Certaines des priorités affichées par cet exercice de prospective nécessitant clairement le développement de solutions à base de petits satellites, il nous paraît indispensable d'optimiser les modes d'interaction de la communauté scientifique avec les CSU/CSE au niveau national afin de tirer les bénéfices de l'essor de ces initiatives des CSU/CSE en proposant :

- De compléter les objectifs pédagogiques propres à chaque CSE/CSE par des objectifs de missions nano-satellite plus en phase avec les besoins en terme de recherche scientifique et/ou de développement technologique ;
- Une synergie plus grande entre centres spatiaux, laboratoires et entreprises en ce qui concerne le développement technologique associé aux projets nano-satellites, afin d'éviter le foisonnement d'actions redondantes ou la fin prématurée de projets par faute de moyens et/ou de compétences.

Même si les projets scientifiques seront les moteurs naturels pour la mise en œuvre effective de ces synergies, nous proposons de les anticiper en organisant dans la continuité de cette prospective, un atelier « nano-satellite » dans le cadre des seize ateliers-défis de la prospective en cours du CNRS-INSU. Cet atelier devra associer tous les acteurs académiques du domaine : centres spatiaux, CNES et laboratoires de recherche (cf recommandation R5) pour discuter de la meilleure manière d'atteindre ces objectifs.

6. Analyse des propositions, perspectives pour les cinq prochaines années

Parmi les différentes petites plateformes associées au phénomène du NewSpace (nano/micro-satellite et plateforme mini-satellite à faible coût de récurrence du type Oneweb), c'est clairement le format nano/micro-satellite « sur-mesure » qui a les faveurs de la communauté scientifique. L'utilisation des plateformes mini-satellites industrielles issues des développements pour les projets de constellation internet globale (par exemple IODA chez Airbus) n'a pour l'instant que très peu d'écho dans nos laboratoires, sans doute en raison de leur trop grande rigidité et des surcoûts importants lorsqu'il faut les adapter pour répondre aux exigences scientifiques.

Afin de décrire notre vision des possibilités que le NewSpace et les nano/micro-satellites offrent à notre communauté pour les dix prochaines années, les enjeux qu'ils présentent et la façon de les développer, nous avons choisi de les regrouper en quatre catégories :

- satellites isolés et démonstrations ;
- constellations ou essaims en orbite basse ;
- constellations ou essaims en orbite haute, géostationnaire, lunaire, ou martienne ;
- petits satellites interplanétaires.

6.1. Satellites isolés et démonstrations

Quelques contributions proposent d'utiliser une plateforme nano-satellite en orbite basse afin de réaliser des expériences de biologie ou de physique en conditions spatiales. Parmi celles-ci, ce sont les expériences de biologie qui sont scientifiquement les plus pertinentes. Elles semblent réalisables sans difficultés particulières, à faible coût, dans des délais courts, et éventuellement dans le cadre de projets pédagogiques.

D'autres contributions proposent de développer des nouveaux systèmes instrumentaux ou capteurs et d'en faire une première démonstration sur une plateforme nano/micro-satellite en astronomie, en observation de la

³ JANUS : (Jeunes en Apprentissage pour la réalisation de Nanosatellites au sein des Universités et des écoles de l'enseignement Supérieur) est un programme CNES qui a pour objectif de promouvoir le spatial auprès des étudiants des écoles et universités françaises à des fins pédagogiques et technologiques. Démarré en 2012 et doté d'un budget de 4,5 millions d'euro il a formé 2000 étudiants et a participé à la dynamique de création des CSU/CSE en soutenant en partie certains de leur projet.

Terre ou pour les télécommunications. Celles qui offrent les perspectives scientifiques les plus intéressantes, astronomie UV et surveillance des tsunamis, pourront être soutenues par des actions de R&T avec des perspectives de démonstration effective dans les cinq ans.

Par ailleurs, tout premier élément d'un projet de constellation (cf sections 6.2 et 6.3 ci après) constitue de fait une démonstration et rentre dans cette catégorie. Les priorités dans le domaine SHM mettent en évidence le besoin crucial d'anticiper une contribution de type nano-satellite de la France aux missions SHM et à des applications en météo de l'espace. Les nouveaux concepts de mission dans ce domaine intègrent en effet désormais systématiquement la fourniture d'un ensemble de nano-satellites, mais souvent avec des calendriers courts impliquant des niveaux de maturité très élevés. Il faut donc démarrer rapidement le développement d'une mission démonstratrice de la faisabilité de mesures plasma in situ et champs à partir d'une petite plateforme. Acquérir une capacité nationale d'une telle fourniture est donc stratégique. Pour cela, il faut étudier, développer et éventuellement réaliser un prototype de nano-satellite dédié à la mesure in situ. Cela implique notamment de résoudre un certain nombre de verrous technologiques (mât, EMC, spin...) au niveau plateforme mais également au niveau instrumentation (miniaturisation).

Dans cette catégorie se rangent aussi deux propositions singulières qui ont émergé pendant les travaux du groupe de prospective. L'une consiste à embarquer des sources RF sur un nano-satellite qui participerait à l'étalonnage du réseau d'observation basse fréquence de l'observatoire sol SKA. La seconde consiste en un nano-satellite de photométrie stellaire de très haute précision afin de préparer les éphémérides de la mission ARIEL (transits exo-planétaires). Chacun étant un élément d'accompagnement d'une grande infrastructure ou mission, c'est dans ce cadre qu'ils doivent être muris et éventuellement décidés.

Les budgets nécessaires pour ces projets s'échelonnent de quelques centaines de milliers d'euros à quelques millions d'euros, selon le degré de complexité du développement et l'objectif recherché.

6.2. Constellations ou essaims en orbite basse

C'est de toute évidence la catégorie la plus riche, la plus accessible et celle qui présente un fort potentiel pour l'utilisation des plateformes nano/micro-satellites à des fins scientifiques dans les cinq à dix prochaines années. Le petit satellite, en constellations ou en essaim, ouvre des possibilités tout à fait inédites pour déployer des systèmes d'observation d'intérêt scientifique majeur : la constellation car elle permet le déploiement de mesures in situ multipoints (SHM) et des observations spatiales à très haute répétitivité (météo, atmosphère, océans, Terre solide) ; l'essaim car il permet de réaliser un système d'observation distribué ayant des performances allant bien au-delà de celles du satellite unique (interférométrie radio et micro-ondes, interféromètre gravitationnel, localisation de sources transitoires).

En observation de la Terre, quatre des priorités prospectives peuvent bénéficier d'une solution nano/micro-satellite de ce type :

- atmosphère : étude de la dynamique de développement des nuages convectifs avec un train de deux ou trois satellites,
- surfaces continentales : interférométrie micro-onde passive et réflectométrie radar pour l'hydrologie continentale,
- Terre solide : mesures de haute précision du champ magnétique terrestre,
- océan et Terre solide : mesure du géoïde terrestre (éventuellement en association avec GRACE).

Dans le domaine des sciences de l'univers, il s'agit de deux des hautes priorités prospectives :

- météorologie de l'espace : mesures multipoints de l'ionosphère terrestre (constellation incluant jusqu'à 72 nano-satellites),
- astronomie : alerte et localisation des sursauts gammas (constellation de 8 nano-satellites),

Ces priorités scientifiques sont pour la plupart techniquement accessibles. Elles peuvent être développées de façon incrémentale, avec des étapes de démonstration à un ou quelques satellites lancés dans les cinq prochaines années, et la possibilité d'un système complet déployé avant dix ans.

Dans le domaine de l'observation de la Terre, il existe clairement des intérêts industriels, et/ou spéculatifs, et donc des possibilités de financement en partenariat public-privé. Certaines missions analysées sont par exemple porteuses à la fois d'un intérêt scientifique certain (même s'il n'est pas priorisé au plus haut niveau par les Groupes Thématiques) et de fortes potentialités en terme de développement d'applications et de services associés tout en étant d'un niveau de maturité technologique accessible dès aujourd'hui. C'est par exemple ce type de missions relativement peu coûteuses que cherche à promouvoir le programme « Earth Venture » de la NASA ou le challenge « Smallsats » de l'ESA.

Les budgets nécessaires s'échelonnent de quelques centaines de milliers d'euros pour un développement de capteur miniaturisé, un million d'euro pour un ou deux nano-satellites de démonstration, et plusieurs dizaines de millions d'euros pour un train, un essaim ou une constellation complète.

6.3. Constellations ou essais en orbite haute, géostationnaire, lunaire ou martienne.

Quelques propositions visent à déployer des systèmes multi satellites (essaims, constellations plus ou moins importantes, concepts mère-filles) au-delà de l'orbite basse : en orbite haute, pour les études magnétosphériques et la météorologie de l'espace ; en orbite géostationnaire, pour un interféromètre à ondes gravitationnelles ; autour de la Lune, pour un grand interféromètre radio basses fréquences et pour un concept d'observatoire des rayons cosmiques des ultra-hautes énergies ; et autour de la planète Mars, pour l'étude de son environnement ionisé et de ses interactions avec le vent solaire. Toutes ces propositions relèvent de concepts de mesure multipoints ou d'instruments répartis.

Trois des priorités scientifiques de la prospective en Sciences de l'univers entrent dans cette catégorie :

- constellation magnétosphérique pour la météorologie de l'espace,
- constellation autour de la Lune pour un grand interféromètre radio basses fréquences (cf Figure 3),
- constellation ou concept mère-filles autour de Mars pour l'étude de son environnement spatial ionisé,

Ces projets sont par nature beaucoup plus ambitieux que ceux en orbite basse car ils nécessitent des moyens importants en terme de lancement, de désorbitation, de communications et de système de positionnement. Il est donc probable qu'ils suivront des schémas de développement plus en ligne avec le spatial traditionnel, les coûts de déploiement importants incitant peu à la prise de risque.

Pas de particularité identifiée pour les budgets à envisager qui seront sans doute similaires à ceux des grandes missions scientifiques actuelles.

6.4. Petits satellites interplanétaires

L'utilisation de petits satellites est envisagée aussi pour accompagner des missions vers les planètes ou vers les petits corps du système solaire, à la façon des deux nano-satellites MarCOs qui ont accompagné la mission INSIGHT vers la planète Mars en 2018 afin de relayer sans délais vers la Terre la télémétrie du module de descente sur la planète. Ceux-ci peuvent être les éléments d'un système d'observation déployé, par exemple pour la gravimétrie ou le sondage radiofréquence d'un petit corps, ou alors ils peuvent venir ajouter une fonctionnalité à la mission pour un coût additionnel modéré et une prise de risque raisonnée. Des missions basées sur des sondes de petit format (< 50 kg) stand alone sont aussi envisageables vers la Lune, Venus, les astéroïdes géocroiseurs et Mars.

Le surcoût associé au petit satellite accompagnant une mission planétaire est de l'ordre de 10 M€ si l'on se réfère à l'exemple de la mission MarCO-INSIGHT.

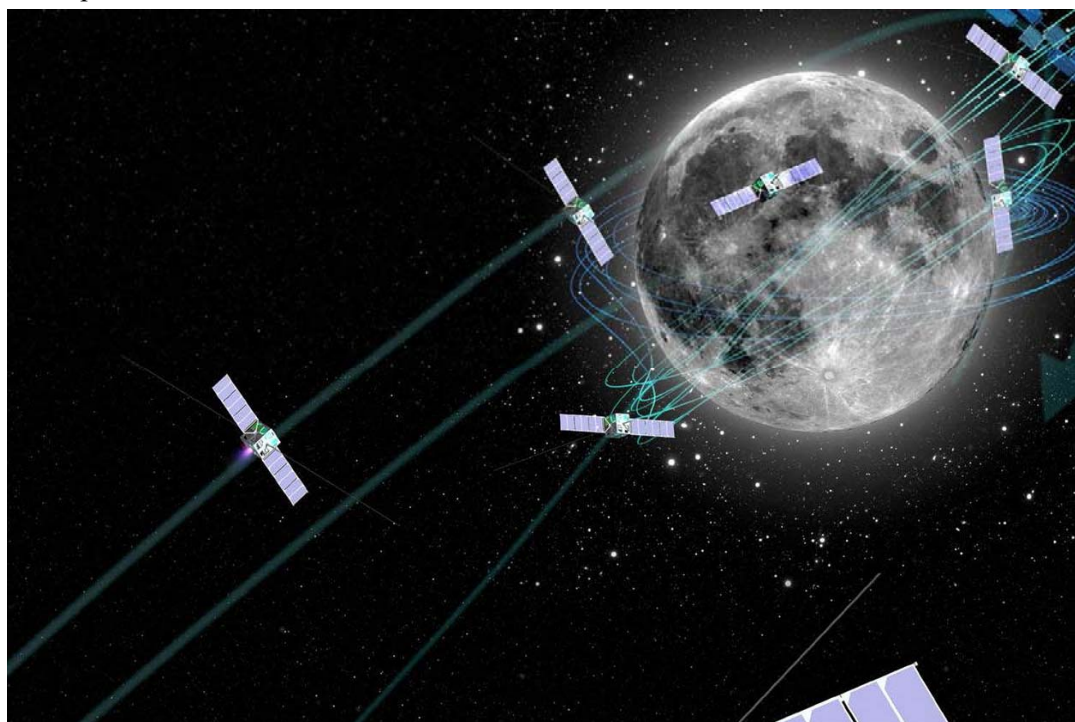


Figure 3 : représentation d'artiste de la constellation NOIRE, interféromètre radio-astronomique basses fréquences autour de la Lune.

7. Recommandations

7.1. R0 : Investir dans la filière nano-satellite pour la science

Les nano-satellites, parce qu'ils sont parfois le seul moyen pour réaliser des missions scientifiques prioritaires, ont un potentiel important qui justifie un investissement significatif du CNES à court / moyen terme, tant pour lever un certain nombre de verrous technologiques que pour la réalisation des missions qui seront mises en avant par les groupes thématiques. Les recommandations qui suivent ont pour objet de préciser les conditions dans lesquelles cet engagement devrait se faire.

7.2. R1 : Repenser et renforcer la notion de démonstration

Traditionnellement la démonstration est l'étape préliminaire qui doit garantir le succès d'une mission ambitieuse ultérieure (dont la décision se place idéalement en série avec la démonstration). Il faut repenser le concept dans le contexte d'une culture de développement / déploiement incrémental ou d'un schéma économique NewSpace :

- Le concept de démonstration technologique est toujours pertinent mais peut être conçu en plusieurs étapes complémentaires (dont les premières n'atteignent pas les objectifs d'une mission réelle) notamment pour la validation de concepts répartis à grande complexité système.
- Lorsque l'on est face à un besoin d'un grand nombre de satellites récurrents (constellation de grande taille), le démonstrateur doit être compris comme un prototype (cependant pas nécessairement représentatif à 100%) dont la série est prévue financièrement et techniquement dans un développement parallèle légèrement décalé (qui peut aboutir à un système hybride hétérogène).

7.3. R2 : Gérer les projets de manière agile dans un mode démonstratif et spéculatif

Dans le prolongement de la recommandation R1, la notion de prise de risque doit être revue pour les systèmes pouvant bénéficier de la dynamique nouvelle.

Au niveau technique :

- pour bénéficier de la dynamique mondiale de développement des technologies, on peut réutiliser les technologies disponibles sur le marché dans les premières phases de démonstration même si leurs performances sont en deçà de ce que requiert la mission finale,
- pour limiter les risques d'échec tardif, il est nécessaire de revoir le concept retenu au vu des résultats intermédiaires,
- pour partager les coûts, il faut envisager des constellations hybrides (plusieurs niveaux technologiques dans un même système opérationnel),
- Enfin il faut adapter les modes de décision, de suivi et de développement au cas des missions satellitaires à bas coûts.

Au niveau économique :

- Il ne faut pas s'interdire de mettre en place un partenariat public / privé équilibré dès la phase initiale du projet pour bénéficier de synergies et de financements complémentaires spéculatifs.

7.4. R3 : Mettre en place un plan de développement de technologies capacitantes et un plan d'évaluation des technologies disponibles sur le marché

Pour être un acteur de premier rang dans le domaine, il convient de disposer des technologies capacitantes, qu'elles concernent un objet individuel ou qu'elles soient à l'échelle du système (les autres technologies peuvent provenir des autres acteurs). Dans cette perspective, il convient de mettre en place un plan d'action ambitieux (qui s'adapte de manière agile à l'apparition des innovations partout dans le monde pour éviter les redondances mais aussi les dépendances) :

- Miniaturisation des équipements ;
- Concepts de mesure nouveaux, adaptés aux faibles volumes ;
- Dispositifs de déploiement (antennes, télescopes, mâts, puissance, thermique...)
- « Swarm technologies »⁴.

⁴ Littéralement : « technologies d'essaim », c'est à dire incluant les problématiques de réseau, d'échange de données et traitement distribué, de localisation et de connaissance de la géométrie de l'essaim, de temps commun, de dynamique orbitale collective

7.5. R4 : Développer des méthodes et outils d'analyse système pour des systèmes répartis, complexes ou hétérogènes

Le fait de concevoir des missions à base de satellites (instruments) multiples pose des questions spécifiques d'inter-calibration, de complémentarité des mesures, de déploiements échelonnés et répartis entre des partenaires divers (publics et privés). La performance résultante ne relevant plus exclusivement de paramètres instrumentaux mais de paramètres techniques à l'échelle du système (voire du système de systèmes), il est recommandé de développer des méthodes et outils d'analyse système sur un cas de mission dimensionnant impliquant des acteurs émanant des secteurs scientifiques, techniques et académiques. Ce travail pourrait déboucher sur des développements de simulations de type OSSE⁵.

7.6. R5 : Définir des modalités de déploiement incrémental des systèmes répartis complexes

De même que la notion de démonstration aura été revue au titre de la recommandation R1, il est nécessaire de penser un programme dans sa dynamique de déploiement. La réflexion devra porter sur les points suivants :

- L'organisation et la gouvernance des partenariats, qu'ils soient publics ou privés (en particulier il faudra prendre en compte les contraintes liées à l'accès à la donnée brute, aux fonctions de transfert, aux conditions d'acquisition, et aux tarifications lorsque c'est applicable),
- Les objectifs mission associés aux différentes étapes du déploiement,
- La logique de prise de décision de programme et de gestion de la fiabilité et de la durée de vie des incréments au vu de la résilience du système global.

7.7. R6 : Favoriser la structuration nationale des actions scientifiques des CSU et CSE

Pour bénéficier à plein du terreau fertile existant dans les CSU / CSE, il convient d'optimiser le mode d'interaction au niveau national :

- Les laboratoires doivent pouvoir s'appuyer sur les CSU, les agences et l'industrie de manière adaptée (en fonction des phases et des typologies de projet) ;
- Les CSU doivent clarifier leur positionnement présent et futur ;
- Il faut encourager les synergies entre les acteurs par l'organisation d'un forum national annuel, le partage d'outils et de méthodologies, etc., pour limiter les actions redondantes.

Cette démarche pourra être initiée à l'occasion du défi #12 « Nano-satellite » de l'exercice de prospective transverse du CNRS-INSU, à réaliser en partenariat avec le CNES.

⁵ OSSE : « Observing System Simulation Experiment »