

Compte-rendu de l'atelier

« Quels débouchés scientifiques pour les nanosatellites ? »

Meudon 25-26 novembre 2013

<http://nanosats.sciencesconf.org>

L'atelier « *Quels débouchés scientifiques pour les nanosatellites ?* » a réuni pendant 2 jours environ 70 chercheurs et ingénieurs majoritairement issus de la communauté française des sciences de l'univers. Cet atelier avait pour objectif d'explorer le potentiel des nanosatellites pour les sciences de l'univers, en abordant les débouchés technologiques et scientifiques, mais aussi éducatifs. Il s'inscrivait dans le cadre de la préparation du séminaire de prospective du CNES (17-20 mars 2014).

Le cadre général de l'atelier était celui des nanosatellites, mais les échanges se sont focalisés sur le concept CubeSat, dont la généralité a largement contribué à l'essor des nanosatellites.

Cet atelier a révélé une forte effervescence dans le domaine des nanosatellites, pour lesquels les idées d'applications à vocation technologique et scientifique dominent aujourd'hui largement sur les débouchés purement éducatifs. Après des débuts hésitants et des taux d'échecs importants, on assiste aujourd'hui à l'émergence d'une véritable filière.

De cet atelier sont issues plusieurs questions et recommandations, qui figurent à la fin de ce document. Dans ce qui suit, nous mettons en exergue les principaux points soulevés lors de l'atelier, sans refaire un descriptif exhaustif des nanosatellites.

Les avantages et les contraintes des nanosatellites

Le succès des nanosatellites (plus exactement, des CubeSats) tient essentiellement à leur standardisation, ainsi qu'à plusieurs avantages :

- Le faible coût comparé à une mission spatiale classique (lancement, composants, etc.) et un temps de développement plus court.
- Le recours à des composants du commerce (cellules photovoltaïques, capteurs magnétiques, accéléromètres, etc.) sans qualification spatiale particulière. Les

industriels produisant ces composants sont par ailleurs souvent intéressés par le retour d'expérience de ces tests de spatialisation.

- Formation: la participation à un projet nanosatellite est très formatrice et motivant. Les étudiants sont particulièrement bien initiés aux aspects système, à la gestion de projet, et à l'instrumentation spatiale.
- L'existence d'une technologie internationale sur des éléments "clef en main" (contrôle d'attitude, senseur solaire ou stellaire, communication à bord, etc.).

Toutefois, les faibles dimensions des nanosatellites en limitent le champ d'applications :

- Le paramètre le plus contraignant est la faible taille. Celle-ci est normalisée, chaque unité faisant $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, pour un poids de l'ordre du kg et une puissance maximale d'environ 1 W quand seules les faces du cube sont couvertes de cellules photovoltaïques.
- La durée de vie est généralement limitée à quelques mois, ce qui prédispose les nanosatellites aux études événementielles, au détriment des mesures à long cours.
- La tenue aux radiations est faible, en raison de la faible épaisseur des parois.
- En l'absence de lanceurs dédiés, la plupart des nanosatellites sont aujourd'hui tributaires du calendrier et de l'orbite de la mission dont ils sont le passager.
- Les nanosatellites conviennent surtout aux orbites basses (<700 km) en raison de la Loi relative aux Opérations Spatiales (LOS), qui exige une solution de désorbitation en cas de temps de vie supérieur à 25 ans.
- Le contrôle thermique peut s'avérer délicat à cause de la faible inertie du satellite.
- Pour la même raison, certaines forces négligeables sur les grands satellites, comme celles générées par les courants de Foucault, peuvent affecter la capacité de pointage. Le contrôle d'attitude peut rapidement devenir un enjeu majeur pour un objet de si petite taille.
- La communication: pour des nanosatellites qui ne sont pas en orbite basse, la communication au sein d'un essaim, avec un vaisseau-mère ou avec le sol est contrainte par la faible puissance disponible. Beaucoup de projets recourent aujourd'hui à la bande UHF/VHF et aux radioamateurs (grâce auxquels la couverture mondiale est excellente). A terme, des bandes à plus haut débit (mais congestionnées) seront nécessaires (bandes S et X).

Les différents débouchés des nanosatellites

L'atelier a permis d'identifier plusieurs types de débouchés des nanosatellites, en plus des projets à vocation pédagogique.

1. Projets pédagogiques

Le domaine d'application le plus visible reste celui des projets pour étudiants, même si cette catégorie est aujourd'hui éclipsée par les applications à vocation technologique. Le savoir-

faire reste largement concentré dans les universités et près de la moitié des projets existants affichent un objectif pédagogique en première ou en seconde priorité. L'expérience montre que si la première génération de satellites n'a pas forcément d'objectif affiché hormis la formation, en revanche, les générations suivantes sont davantage conçues en fonction d'objectifs scientifiques précis.

2. Démonstrateurs

Plus de la moitié des projets visent la démonstration comme premier objectif. Les applications vont de la validation de concepts existants (avec amélioration du TRL) à la démonstration de concepts nouveaux. L'avantage du nanosatellite réside ici dans son accès rapide et bon marché à l'espace. Ces débouchés conviennent davantage aux systèmes qu'aux composants individuels ; ils servent plus souvent à valider et ne sauraient remplacer un véritable processus de qualification. Le retour d'expérience montre qu'il n'est pas souhaitable de tester plus d'un système à la fois sur un même nanosatellite.

Les nanosatellites sont particulièrement en phase avec les besoins croissants en miniaturisation et nécessitent parfois de repenser entièrement le concept instrumental pour le rendre compatible avec les contraintes de taille, de masse, etc. Plusieurs acteurs ont souligné l'importance de ce changement de paradigme, dans lequel il faut oser repenser l'instrument et oser le saut technologique.

Toutes les catégories de systèmes sont concernées : capteurs optiques dans toutes les bandes du spectre électromagnétique (projets SERB, μ BOS, CIRCUS), détecteurs de particules (ROBUSTA, IGOSAT), modes de propulsion (propulsion électrique, ou à gaz neutre), systèmes de contrôle d'attitude, etc.

3. Applications scientifiques

Moins d'un cinquième des nanosatellites affichent aujourd'hui la science comme objectif prioritaire. Cependant, cette catégorie se développe très rapidement. Le faible coût des nanosatellites les prédispose à des missions particulières:

- **Les missions ciblées**, pour lesquelles il n'est pas souhaitable d'engager une grosse charge utile. Le nanosatellite permet par exemple d'étudier à moindre coût des phénomènes physiques spécifiques, comme l'airglow (SwissCube), la transmission d'un signal radar émis depuis le sol (RAX) ou encore engranger des données observationnelles dans le milieu interplanétaire (Mars Flyby).
- **Les missions à caractère préparatoire** (« *pathfinder* ») en guise de petit démonstrateur pour des missions de plus grande ampleur. Le nanosatellite permet par exemple de dimensionner des mesures optiques avant d'engager un plus gros projet (First-S). Le bénéfice réside ici dans la réduction de la prise de risque sur des futurs projets.
- **Le vol en réseau ou en constellation avec des mesures distribuées**, donnant accès à une couverture spatiale inégalée. Il s'agit généralement de mesures in situ (QB50), quoique les mesures optiques sont en nette augmentation. Un autre atout de l'essaim est sa résilience, puisque la perte de certains satellites n'affecte pas les

objectifs globaux de la mission. Ces vols en réseau ou en constellation prédisposent évidemment les nanosatellites à l'étude du système thermosphère/ionosphère; l'armée de l'air américaine est très investie sur ce créneau. Un des gros défis est la communication entre nanosatellites et le sol, ainsi que la gestion des interactions entre nanosatellites.

- **Les missions vers des horizons qui sont hors de portée pour les autres projets, et avec une prise de risque importante.** Par analogie avec les drones en aviation, le nanosatellite peut servir à explorer des régions dangereuses, voire accomplir des missions-suicide. Cela comprend notamment la rentrée atmosphérique pour faire des sondages d'atmosphères planétaires (projet ExCSITE). Il s'agit ici de projets de type « *low cost for high risk* ».

Ces différentes applications concernent surtout l'étude in-situ de l'environnement terrestre, mais il existe aussi des projets en physique de l'atmosphère et observation de la Terre, ainsi que pour la planétologie et l'astrophysique.

4. Formation permanente du personnel

Un atout non négligeable des nanosatellites est la flexibilité du calendrier, ce qui favorise leur insertion dans les plans de charge souvent très remplis des laboratoires. Une dimension importante, et pourtant rarement évoquée, est l'implication forte des équipes techniques dans des projets qu'ils jugent motivants, et qui leur permettent de maintenir un minimum d'activité de formation.

5. Autres applications (militaires, commerciales)

Aux Etats-Unis, la défense est le premier organisme financeur ainsi qu'un important utilisateur de nanosatellites. En Europe, en revanche, les financements ainsi que les applications concernent exclusivement le secteur civil.

Les applications commerciales et les financements privés sont encore rares, mais à terme un marché devrait se développer autour de nouvelles applications. Les principaux constructeurs de satellites suivent de près l'essor des CubeSats.

Aujourd'hui, le seul réel marché est celui de la fourniture de kits clés-en-main pour les modules de communication radio, de contrôle d'attitude, etc. Toutefois, très peu d'utilisateurs y ont recours et ces kits souffrent d'un manque de standardisation ainsi que d'un service après-vente quasiment inexistant.

Retour d'expérience

L'atelier a soulevé un déficit en retour d'expérience, et une demande forte pour mieux connaître les erreurs inhérentes à ce genre de projet nouveau. Parmi les points soulevés, signalons:

- La gestion des ressources humaines est complexe et nécessite un organigramme précis. Ces difficultés sont accentuées par le roulement important des étudiants (lorsqu'il y en a) et les problèmes de transmissions de compétence qui en découlent.
- Tous les acteurs insistent fortement sur le besoin impératif de ne pas faire l'économie des nombreux tests (AIT, AIV, etc.) et revues de projet. La plupart des échecs sont dus au non-respect des tests dans les phases finales de réalisation. Cependant, près de la moitié des échecs subis jusqu'ici par des CubeSats sont attribuables au lanceur et non au satellite.
- Les configurations en 1U (un seul cube) et 2U (2 cubes) s'avèrent souvent trop contraignantes pour accueillir une charge utile en plus de tous les systèmes de la partie plateforme (contrôle d'attitude, batterie, etc.). En revanche, elles sont bien adaptées pour des premières réalisations. La configuration 3U est recommandée pour des missions nécessitant un besoin de contrôle d'attitude assez précis et des ressources en masse et puissance pour les instruments de l'ordre d'1kg/2W.
- La réalisation d'un projet de type nanosatellite convient bien à un réseau de laboratoires, ce qui permet de répartir les efforts. De tels projets se prêtent aussi à des collaborations internationales.

Applications pour la science/technologie : bilan

L'atelier a montré que les nanosatellites ont de réels atouts par rapport aux projets scientifiques de plus grande taille, à condition de :

- Recourir à des CubeSats, dont la standardisation est un avantage majeur.
- Viser des débouchés compatibles avec leurs caractéristiques, et ne pas chercher à reproduire en plus petit ce qui est réalisable par ailleurs. Il est donc important de repenser la science et d'oser des sauts conceptuels ou technologiques.
- Tenir compte des nombreuses contraintes, dont la taille réduite, qui exclut de facto certains types d'instruments (optique à très haute résolution, etc.). En revanche, la prise de risque plus élevée permet de s'affranchir de certaines règles, telles que la redondance.
- Ne pas sous-estimer l'investissement nécessaire pour réaliser une telle mission et surtout le défi organisationnel que cela représente si des étudiants y sont associés. Le

coût réel d'un projet CubeSat est encore difficile à évaluer bien qu'il soit très inférieur à celui d'un satellite classique. Le coût de développement (charge utile, segment sol, essais, lancement) d'un projet varie typiquement de 250kEuro pour une configuration 1U, à 1MEuro pour une configuration 3U. La charge représente 5-7 ETP sur 3-4 ans. Ces chiffres sont cependant peu représentatifs de projets scientifiques ou techniques, car ils émanent de projets pour étudiants, faits des équipes avec peu d'expérience préalable dans le spatial.

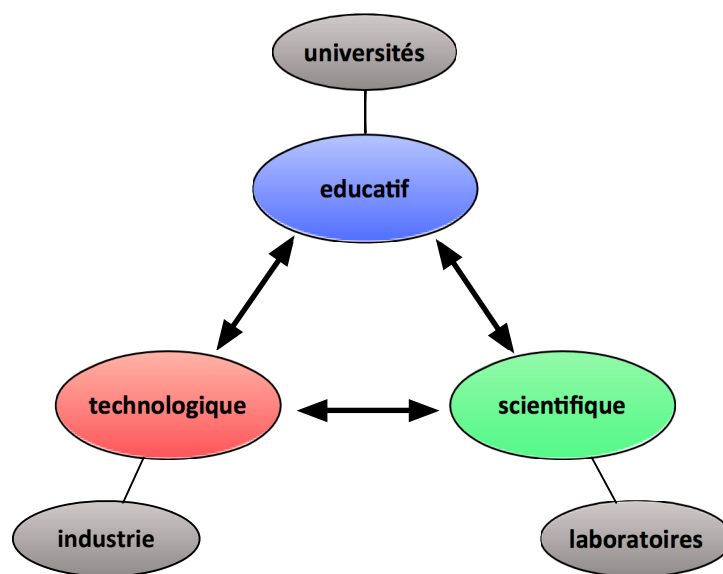
- Ne point sacrifier les étapes de validation, en respectant la même philosophie que pour des projets classiques: l'assurance produit et l'assurance qualité doivent être éventuellement allégées mais restent au cœur de ces projets.

Quelles pistes pour la communauté française ?

Le programme JANUS du CNES a eu le mérite d'initier plusieurs universités et laboratoires français aux projets CubeSat pour étudiants. Pour les applications scientifiques et technologies, tout est à créer. Les débats organisés lors de l'atelier ont soulevé à ce sujet de nombreuses questions mais ont aussi exprimé des besoins précis :

- D'abord une certitude: les CubeSats ne sont plus seulement réservés aux projets éducatifs mais offrent de réels débouchés scientifiques et technologiques, à condition de bien viser des projets pertinents pour lesquels ils peuvent apporter une plus-value.
- De tels projets ne peuvent se substituer aux projets éducatifs : les deux sont complémentaires et visent des objectifs différents, même s'il est possible d'associer des étudiants à des projets à dominante scientifique ou technologique, et inversement.
- Face à l'effervescence actuelle, il existe un besoin pour canaliser les diverses initiatives. Le CNES peut ici jouer le rôle d'animateur en aidant la communauté à mettre en place une feuille de route pour les années à venir.
- S'il existe un programme bien identifié pour le financement des projets éducatifs (le programme JANUS), en revanche, il n'y a pas de guichet dédié pour les autres projets. La situation est plus complexe encore pour les montages internationaux. Il serait souhaitable que CNES commence par lancer un appel à idées sur les réalisations possibles, en s'adressant à la fois aux communautés d'observation de la Terre, et des sciences de l'Univers. Cet appel à idées aurait pour but de recenser les besoins de la communauté (au niveau système et instrumental) et les verrous technologiques à ouvrir pour parvenir à une génération de CubeSats scientifiquement performants. Pour cela, l'appel à idées pourra être orienté autour de projets scientifiques très innovants, accompagnés d'une feuille de route dans lesquelles seront bien identifiés les verrous technologiques. La liste des verrous ainsi dégagée pourrait être alors proposée pour les futurs projets étudiants.

- Pour le séminaire de prospective, nous souhaitons qu'une table ronde soit organisée sur la place des CubeSats dans le programme spatial français.
- Il existe un besoin clairement identifié pour des systèmes normalisés (par exemple le contrôle d'attitude, la communication à bord, la propreté électromagnétique, la propulsion, etc.). Le CNES pourrait ici aider à identifier les systèmes à développer et encourager des actions de R&T sur les éléments les plus stratégiques.
- Pour conclure, le montage idéal d'un projet CubeSat est représenté par le triptyque ci-dessous. Selon le type de sujet (technologique, scientifique ou éducatif), l'accent sera plus fortement mis sur un des trois pôles, mais il est important que les trois soient présents dans le projet.



Les deux pages qui suivent offrent un recensement non exhaustif des applications des CubeSats, compilé par B. Segret lors de l'atelier.

Cet atelier a bénéficié du soutien du CIAS (Centre International d'Ateliers Scientifiques), du LABEX ESEP (Environnements Spatiaux et Planétaires), et du CNES. Son comité d'organisation était constitué de : Baptiste Cecconi (LESIA, Meudon), Pierre Drossart (LESIA, Meudon), Thierry Dudok de Wit (LPC2E, Orléans), Alain Gaboriaud (CNES, Toulouse), Jean-Pierre Lebreton (LESIA, Meudon & LPC2E, Orléans), Boris Segret (LESIA, Meudon).

13 Décembre 2013



Applications Scientifiques / Pédagogiques

parmi toutes les applications scientifiques présentées à l'atelier, il est apparu nécessaire de distinguer celles à finalité scientifique (avec ou sans étudiants) et celles à vocation première pédagogique.

=> une classification de ces projets sera proposée suite à l'atelier.

- **Météorologie de l'Espace (Obs. Terre, LEO)**
 - ◆ Mesure bruit thermique
 - ◆ Mesure radar sur ionosphere
 - ◆ Activité solaire (EMC / Solar Flares)
 - ◆ Budget de radiations Terre
- **Atmosphère terrestre / LEO**
 - ◆ Aérosols
 - ◆ Photométrie bande O2 (64nm/CMOS, 760nm)
 - ◆ Tropospheric CO2 total column
 - ◆ Échappement atmo. (planéto. Comparée)
- **Plasma Terre (LEO/MEO)**
 - ◆ Ionosph., e-, γ / SAA & Cornets (MEO)
 - ◆ Thermosphère Terre (LEO)
 - ◆ Comptage e-, H+ relativistes (LEO)
 - ◆ Caractérisa° radio régions aurorales (LEO)
 - ◆ Anomalie Magnétique (LEO)
- **Autres applications en observation de la Terre**
 - ◆ Gravimétrie Terre
 - ◆ Météorologie (épisodes cévenols via navires)
- **Hors observation de la Terre, depuis LEO :**
 - ◆ Planétologie radio (depuis Terre, LEO)
 - ◆ Exoplanétologie (par constella° ou interféro.)
 - ◆ Photo-Polarimétrie zodiacale
 - ◆ Cosmologie par radio < 10MHz
 - ◆ Soleil en IR lointain & interféro
 - ◆ Irradiance solaire
- **Sciences au-delà de la LEO :**
 - ◆ Magnétométrie (Lune)
 - ◆ Structure interne Lune
 - ◆ Planétologie in situ :
 - premiers concepts / explora° planétaire : surface & regolith petits corps (imagerie UV/IR), impacteurs
 - Plasma & Hautes énergies : SEP / GCR hors influence Terre

parmi toutes les applications technologiques présentées à l'atelier, il est apparu nécessaire de distinguer celles à finalité technologique (avec ou sans étudiants) et celles à vocation première pédagogique.

=> une classification de ces projets sera proposée suite à l'atelier.

De plus, les applications ci-dessous sont de deux types :

- "pour Nanosats" : sous-systèmes développés afin de faciliter les projets CubeSats / Nanosats
- "orientées TRL" : démonstration de technologies nouvelles (non spécifiques aux nanosats)

Applications "pour Nanosats"

- Instrumentation répartie, essais / formations
 - ◆ Éléments COTS spatialisés
 - ◆ Télécomm. & GNSS inter-CubeSats
 - ◆ Plateformes 3U, 6U, 12U...
- Contexte de missions interplanétaires :
 - ◆ Télécomm. directe (jusqu'à 1.5MKm)
 - ◆ Navigation (positionnement & correction)
 - ◆ Propulsion électrique, voile solaire
 - ◆ Antennes Grand Gain (deployable)
- Modularisation des sous-systèmes CubeSats
 - ◆ μ -Processeur
 - ◆ Contrôle d'attitude, Avionique "plug & play"
 - ◆ Contrôle d'orbite (désorb., réhausse, correc°)
 - ◆ Contrôle du potentiel électrique
- Systèmes support
 - ◆ Stations sol
 - ◆ Méthodes de tests "cubesat" (plug & test)

Applications "orientées TRL"

- Capteurs / Composants:
 - ◆ Exposé aux radiations (environn. spatial)
 - ◆ Composants en hyperfréquence optique
 - ◆ Capteurs bolométriques
 - ◆ Micro-mécanismes
- Systèmes:
 - ◆ Rentrée atmosphérique, ét. limites atmo
 - ◆ Spectro.de masse par laser dans un gaz
 - ◆ Radio-réception numérique
 - ◆ Ion-Neutral Mass Spectrometer
 - ◆ Ionisation de particules
 - ◆ Corner Cube Retro-reflectors miniatures
 - ◆ Interférométrie multipupilles (HRA)
 - ◆ Hypertélescope
 - ◆ Navigation autonome
 - ◆ Pre-processing (analyse à bord, data volume)