

Nanosat : une révolution de petite taille

Par Imane EL KHANTOUTI et Didier DONSEZ

Centre spatial universitaire de Grenoble (CSUG)

L'avènement des nanosatellites a transformé et démocratisé l'accès à l'espace en présentant une option plus économique et modulaire par rapport aux satellites traditionnels. Ces satellites compacts et normalisés sont utilisés dans divers domaines, de l'observation de la Terre aux télécommunications, alimentant ainsi la dynamique du *New Space*. Le déploiement des nanosatellites est réalisé par des acteurs privés et des institutions académiques. Cette approche se caractérise par des technologies légères, des cycles de développement courts, l'agilité dans la gestion de projet et une tolérance accrue à l'échec, se distinguant ainsi de l'approche plus classique de l'*Old Space*. L'écosystème du *New Space* englobe une variété d'acteurs, des équipementiers, aux transporteurs, aux lanceurs, aux agences gouvernementales et aux universités. Malgré les opportunités offertes par les nanosatellites, des défis persistent, notamment la gestion des débris spatiaux, les interférences radio dans les communications et les menaces de cyberattaques.

INTRODUCTION

Avant d'examiner de plus près les nanosats, commençons par un peu de contexte. L'histoire des nanosats a débuté en 1999 en tant qu'initiative collaborative entre Jordi Puig-Suari, professeur à l'Université d'État polytechnique de Californie (Cal Poly), et Bob Twiggs, professeur au Laboratoire de développement de systèmes spatiaux de l'Université Stanford (SSDL). L'objectif initial de ce projet était de démocratiser l'accès à l'espace pour la communauté scientifique universitaire. Le premier CubeSat a été lancé en orbite en 2003, marquant le début d'une ère nouvelle dans l'exploration spatiale permettant à de nombreuses universités, *start-up*, petites et moyennes entreprises, ainsi que des pays en développement de disposer de programmes spatiaux basés sur les nanosats¹. Ceci en profitant de la standardisation et de la miniaturisation des composants et des services proposés par la multitude des acteurs privés *New Space* qui ont émergé dans les années 2000 sur le marché spatial.

Le contraste entre le *New Space* et le *Old Space* marque l'évolution dynamique de l'industrie spatiale, présentant des différences notables en termes de technologies, modèles économiques et mentalités. L'approche technologique de l'*Old Space* était historiquement caractérisée par des technologies coûteuses et robustes, principalement développées par des agences gouvernementales, avec des missions souvent planifiées sur de longues périodes avec des budgets colossaux.

¹ NASA (revision dated October 2017), "CubeSat 101 – Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers", 96 pages, https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/03/nasa_csli_cubesat_101_508.pdf

En revanche, le *New Space* adopte des technologies nouvelles, plus légères et abordables, utilisant des composants commerciaux parfois réutilisables comme certains lanceurs et des approches innovantes. Le *New Space* recherche un *time-to-space* réduit avec des cycles plus courts et avec l'acceptation plus importante de l'échec. Les missions *New Space* sont lancées par des entreprises privées, des *start-up* opportunistes et des acteurs académiques cherchant à rentabiliser l'accès à l'espace et mettant l'accent sur la commercialisation des services spatiaux.

LES NANOSATELLITES

Les nanosats, également appelés nanosatellites, sont de petits satellites artificiels de taille réduite conçus pour effectuer diverses missions dans l'espace comme les télécommunications, l'observation de la Terre et de l'Espace, ou bien encore des expériences scientifiques en micro-gravité.

Ces satellites sont caractérisés par leurs dimensions compactes et standardisés et leur poids relativement faible par rapport aux satellites conventionnels également appelé *fatsats*². Les Cubesats sont une catégorie populaire de nanosatellites. Ils sont normalisés en unités cubiques (U), où 1U équivaut à 10 x 10 x 10 centimètres et peut peser jusqu'à 1,33 kg. Les Cubesats peuvent être assemblés en plusieurs unités, par exemple, 2U, 3U, 6U et jusqu'à 16U voir 48U. Les PocketQubes sont encore plus petits que l'unité d'un cubesat. Ils sont normalisés en unités p, où 1 p équivaut à 5 x 5 x 5 centimètres et peut peser de 0,1 à 0,15 kilogramme. Il existe des formats encore plus compacts tels les FemtoSats (1F équivaut 3 x 3 x 3 centimètres) ou bien encore les ThinSats dont les dimensions, qui sont celles d'une tranche de pain de mie, sont compatibles avec les *Pods* des cubesats 3U.

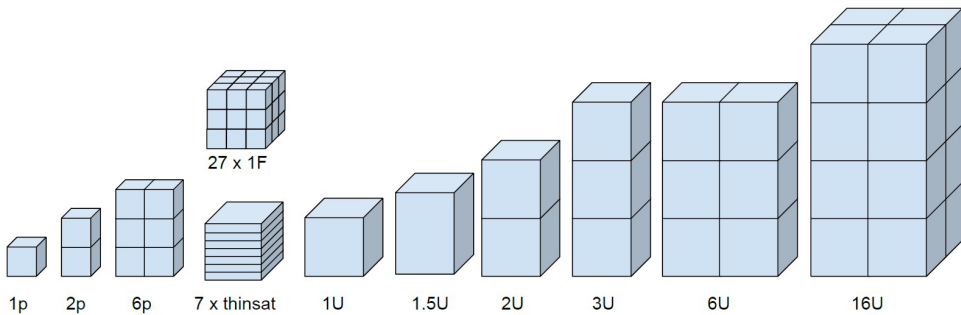


Figure 1 : Exemples de dimensions de nanosats : PocketQube, Thinsat, Femtosat, Cubesat (© Didier Donsez et Imane El Khantouti).

L'avantage majeur des nanosatellites réside dans leur coût réduit par rapport aux *fatsats*. Leur conception modulaire et leur capacité à partager des lanceurs avec d'autres charges utiles contribuent également à réduire les coûts de lancement et des mises en orbite sur des orbites basses conventionnelles principalement, les orbites héliosynchrones (SSO) et ISS. Leur construction repose sur l'assemblage de composants sur étagère dont d'autres exemplaires ont déjà servi dans des satellites ayant volé (*flight heritage*) ou non, disponibles chez des nombreux fournisseurs concurrents. La durée de vie des nanosats varie selon la mission et la robustesse des composants aux aléas de

² En comparaison, la masse d'un des 3 200 satellites Starlink est de 260 kg, 6 200 kg pour télescope James Webb et 420 000 kg pour la Station spatiale internationale (ISS).

la météo spatiale. Les missions courtes durent quelques mois. La durée des missions prolongées dépasse la décennie.

Le coût de développement d'un nanosat est encore réduit quand il est développé pour une constellation homogène de plusieurs nanosats. À titre d'exemple, Planet Labs Inc. a mis en orbite successivement plusieurs constellations de cubesats pour l'observation de la Terre. La première constellation Flock 1 est constituée des 28 cubesats 3U pesant 5 kg lancés en 2014. La constellation de l'opérateur français Kineis pour l'Internet des Objets par Satellite est composée de 25 cubesats 16U.

Selon la base de données Nanosats Database, au 30 octobre 2023, il y avait plus de 2 400 nanosatellites lancés dont 2 213 cubesats, dont 12 à usage interplanétaire. Connaissant une croissance remarquable, 82 pays et 682 entreprises sont impliqués dans des missions de nanosatellites. 60 % de nanosats mis en orbite sont pour des applications de télécommunication³.

LES APPLICATIONS

Les nanosatellites, grâce à leur conception compacte et économique, partagent des similitudes d'utilisation avec les satellites de plus grande taille, touchant divers domaines d'application.

Dans le domaine de l'observation de la Terre, les nanosatellites sont équipés de systèmes d'imagerie multi-spectrale et hyperspectrale, de spectromètres ainsi que de capteurs infrarouges. Ces technologies permettent d'étudier les changements environnementaux, de fournir des données météorologiques précises et de réaliser une cartographie détaillée de la surface terrestre.

En ce qui concerne les télécommunications, les nanosatellites offrent un large éventail de services, notamment l'accès à Internet à haut débit, l'Internet des objets (IoT), la surveillance des avions et des navires *via* les systèmes de suivi ADSB et AIS ou les services d'urgence *phone-to-sat*, ainsi que la distribution quantique de clés cryptographiques⁴ pour assurer une communication sécurisée.

Sur le plan scientifique, ces satellites compacts sont utilisés pour des missions diverses telles que l'étude de la météo de l'espace, les études en microgravité telles que la croissance de cristaux de molécule pharmaceutiques, des végétaux et des champignons ou la fabrication additive. D'autres missions scientifiques concernent l'astronomie en capturant des données sur des phénomènes célestes ou bien l'exploration interplanétaire pour des missions spécifiques vers d'autres planètes ou corps célestes (*deep space*).

LA GESTION DE PROJET NANOSATELLITE

Dans l'industrie spatiale, les projets suivent une méthodologie bien définie, articulée autour de sept phases conformes aux normes européennes. La phase 0 initie le processus par une analyse approfondie de la mission, évaluant les besoins, les coûts et la faisabilité. La phase A précise ces besoins pour établir la viabilité du projet, tandis que la phase B

³ KULU E. (2023), "Small Launchers - 2023 Industry Survey and Market Analysis", 74th International Astronautical Congress (IAC 2023), Baku, Azerbaijan, 2-6 October 2023, https://www.newspace.im/assets/Small-Launchers-2023_Erik-Kulu_IAC2023.pdf

⁴ KERSTEL E., GARDELEIN A., BARTHELEMY M., The CSUG Team, FINK M., JOSHI S. K. & URSIN R. (2018), "Nanobob: a CubeSat mission concept for quantum communication experiments in an uplink configuration", *EPJ Quantum Technology*, 5(1):6, <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-018-0070-7>

affine le concept avant une évaluation préliminaire. La conception détaillée prend forme lors de la phase C, suivie par la phase D axée sur la production, l'assemblage et les tests du matériel. Enfin, la phase E se concentre sur les opérations de lancement, approvisionnement et l'exploitation du satellite répondant aux besoins identifiés pour achever les objectifs de la mission. Chaque phase est validée par une revue avant de passer à la suivante⁵.

Dans une équipe de mission nanosatellite, plusieurs rôles clés contribuent à la réussite du projet. Le chef de projet, souvent nommé *mission manager* ou *project manager*, assume la responsabilité globale. Un responsable qualité assure la conformité aux normes de l'industrie et aux réglementations (notamment la Loi sur les Opérations Spatiales pour la France), tandis que l'ingénieur système supervise le développement du système spatial en garantissant la conformité aux exigences spécifiques. Des experts en différents domaines tels que la mécanique, l'informatique, les télécommunications, l'électronique embarquée ou encore la transmission, jouent un rôle crucial. D'autres experts peuvent intervenir selon les objectifs de la mission comme les opticiens. L'équipe peut faire appel à un support juridique et réglementaire puisque la mission doit être conforme aux lois nationales et réglementations internationales portant sur des opérations spatiales, et devoir déclarer l'exploitation des données d'origine spatiale et procéder à la déclaration des fréquences pour les télécommunications.

Face aux contraintes temporelles et budgétaires des projets nanosatellites, l'agilité devient un impératif pour ces équipes, nécessitant une flexibilité et une adaptabilité constante, notamment dans un contexte où les reports de lancement sont fréquents et aussi l'évolution des normes réglementaires⁶. Dans le cadre d'une constellation lancée en plusieurs lots, l'agilité devient nécessaire du fait qu'il est parfois nécessaire de reprendre la mission sur des phases C et D, fort des expériences des mises en orbite précédentes.

L'ARCHITECTURE D'UNE PLATEFORME CUBESAT

Les Cubesats, en tant que satellites miniatures, intègrent plusieurs sous-systèmes pour assurer leurs missions dans l'espace⁷. Voici une liste des principaux sous-systèmes présents dans un CubeSat :

- Charge utile (*Payload* en anglais) : le cœur de la mission, elle est adaptée aux objectifs spécifiques du projet, elle peut être une caméra, un spectromètre, une carte de télécommunication et antenne à gain dédiée.
- Ordinateur de Bord (OBC) : il est le cerveau du CubeSat, responsable du contrôle, de la gestion des charges utiles, de la navigation et de la synchronisation des opérations à bord.
- Contrôle Thermique : il permet de surveiller et réguler la température de tous les composants du satellite, en définissant une plage de température de vol autorisée

⁵ NASA (revision dated October 2017), "CubeSat 101 – Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers", 96 pages, https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/03/nasa_csl_cubesat_101_508.pdf

⁶ EL KHANTOUTI I. (2023), "Guidelines for Processes and methods for a successful space mission in a very tight schedule for project programme managers", 74th International Astronautical Congress (IAC 2023), Baku, Azerbaijan, 2-6 October 2023, <https://iafastro.directory/iac/paper/id/79681/abstract-pdf/IAC-23,D5,1,4,x79681.brief.pdf?2023-03-31.19:38:52>

⁷ OLIVA A. A., SCHAALMAN G. P. & STALEY S. L. (2011), "Design and Analysis of Subsystems for a CubeSat Mission", <https://digitalcommons.wpi.edu/mqp-all/2756>

pour chaque élément, garantissant leur résistance aux conditions thermiques extrêmes de l'espace.

- Alimentation électrique : composé de panneaux solaires fixes ou déployables et de batteries rechargeables, ce sous-système garantit l'autonomie énergétique du Cubesat en générant et stockant l'électricité nécessaire aux opérations diurnes et nocturnes des autres sous-systèmes.
- Communication : il comprend les équipements de transmission et de réception de données, tels que les cartes multi-bande et les antennes fixes ou déployables, permettant d'établir les liens entre le nanosat et le réseau de stations terrestres ou d'autres satellites dans le cas des liaisons inter-satellites
- Déploiement : il est responsable du déploiement des antennes, des panneaux solaires ou d'autres équipements une fois le CubeSat en orbite.
- Détermination et de contrôle de l'environnement (EDCS) : il surveille les paramètres environnementaux tels que la température, la pression, le rayonnement, etc., afin de garantir le bon fonctionnement du satellite.
- Navigation et de positionnement : intégrant un récepteur GNSS, une horloge atomique miniature pour les missions extra-terrestres ou encore des capteurs stellaires, il assure le positionnement précis du CubeSat dans le temps et dans l'espace.
- Contrôle d'altitude et détermination de l'orientation (ADCS ou SCAO) : ce sous-système comprend des capteurs, des actionneurs et des algorithmes permettant de contrôler et stabiliser l'orientation du CubeSat dans l'espace. Les actionneurs sont principalement des roues à réaction et de magnéto-coupleurs utilisant le champ magnétique terrestre.
- Propulsion : il peut inclure des moteurs, des propulseurs chimiques ou électriques ou des systèmes de contrôle de la poussée, pour ajuster l'orbite, effectuer des manœuvres d'évitement ou de changement d'orbite ou maintenir la stabilité du satellite. Ce système reste néanmoins exceptionnel dans les CubeSats les plus petits.
- POD (Picosatellite Orbital Deployer) : c'est une structure modulaire externe, souvent attachée au transporteur spatial, permettant de le transporter dans le lanceur puis d'éjecter un ou plusieurs nanosats simultanément sur l'orbite choisie.

Les sous-systèmes sont assemblés au sein d'une plateforme assurant le bon fonctionnement du CubeSat. Ils sont reliés entre eux par l'interface mécanique et électrique de la plateforme. Cette interface suit plus ou moins un standard pour faciliter l'utilisation des sous-systèmes en provenance de plusieurs fabricants. Ces fabricants proposent souvent des sous-systèmes offrant une interface de type PC104. L'OBC communique avec les autres sous-systèmes en utilisant divers moyens tels qu'Ethernet, CAN, UART, RS-485, RS-422, SPI, I2C, etc. Ces connexions peuvent être également établies à l'aide de nappes flexibles ou de câbles coaxiaux, en particulier lorsqu'ils sont reliés à des antennes externes.

Le dimensionnement de la plateforme (structure, panneaux solaires, batteries et antennes) dépend des dimensions de la charge utile de la mission et des besoins en électricité de celle-ci et des autres sous-systèmes (principalement ADCS, communication, thermique, OBC). À titre d'exemple, les panneaux solaires d'un CubeSat 3U produisent de 5 à 7 W.

La plateforme et les sous-systèmes sont soumis à des contraintes de vibration, de température et de compatibilité électromagnétique lors de la phase de lancement et de mise en orbite par le transporteur. Dès qu'ils se trouvent en orbite, les sous-systèmes sont soumis à la fois aux changements extrêmes de température et aux radiations spatiales. Ces contraintes impliquent une qualité de fabrication des sous-systèmes par l'utilisation des composants mécaniques et électroniques *a minima* de qualité automobile et militaire.



Figure 2 : Vues du cubesat 2U AMICAL
(Identifiant NORAD 46287)
du Centre spatial universitaire de Grenoble
pour l'observation des aurores boréales
en orbite basse © CSUG,
Université Grenoble Alpes).

Il faut s'assurer également que les matériaux ne dégazent pas ou ne cristallisent pas dans le vide. L'utilisation des composants durcis aux radiations (radiation hardened) renchérit beaucoup le coût des systèmes. Les tests environnementaux (*a minima* vibration, vide thermique, CEM) planifiés dans la phase C du projet limitent des risques pour la mission.

Dans les cas des PocketQubes, Thinsats et FemtoSats, l'architecture est complètement intégrée, du fait des contraintes de taille.

LES COMMUNICATIONS

Les nanosatellites utilisent divers moyens de communication qui servent à la fois à leur pilotage par l'envoi des commandes des communications de l'opérateur et la réception de télémétrie (appelé TM TC), et au transfert des données de la charge utile. Leur taille réduite impose des contraintes en termes de consommation énergétique qui influent sur le débit des transferts. Les nanosats en orbite basse ne communiquent que de manière transitoire avec le réseau de stations terrestres ce qui réduit le volume de données échangés.

Les communications utilisent des liaisons radiofréquences (RF). Les liaisons radiofréquences peuvent se faire au travers d'antennes omnidirectionnelles ou bien directives à polarisation circulaire. L'utilisation d'antennes directives impose l'usage d'un ADCS. Les bandes de fréquence utilisées par les opérateurs de CubeSat sont très majoritairement les bandes UHF (400 à 438 MHz, la bande S (2,2-2,4 GHz) et les bandes X (8,2 Ghz, 8,4 Ghz, 10,5 Ghz). L'usage de ces bandes est sujet à déclaration auprès des agences nationales de régulation des fréquences (ANRF en France) qui se coordonnent au sein de l'UIT/IUT (Union Internationale des Télécommunications). Certaines bandes de fréquence sont gérées par l'AMSAT, l'association des radio-amateurs satellite. Les communications Laser (LaserCom) offriront des débits importants et ne nécessitent pas de déclarations. Cependant, elles requièrent un ADCS précis couplé avec un mécanisme de stabilisation optique (type gimbal...).

Les communications sont établies entre le nanosatellite (appelé bord) et des stations terrestres (appelé sol) pour établir des liaisons montantes (sol-bord) et descendantes

(bord-sol). Plusieurs entreprises gèrent des réseaux de stations terrestres dans plusieurs téléports répartis sur la Terre. Les communications peuvent être établies également avec les satellites de constellations de télécommunication (MEO, GEO) comme Iridium ou Globalstar. Les liaisons inter-satellites (ISL pour Inter-Satellite Link) sont utilisées notamment pour réaliser des constellations de télécommunication globale à faible latence. Les routages dans ces constellations sont dynamiques car les liaisons apparaissent et disparaissent rapidement avec le déplacement des nanosatellites.

LES ACTEURS *NEW SPACE*

Le *New Space* est caractérisé par une diversité d'acteurs, allant des équipementiers de sous-systèmes et de plateformes, des opérateurs, d'agences de facilitation (*broker*) dans la gestion de projet nanosatellite, des transporteurs et des lanceurs, des téléports aux assureurs et agences gouvernementales et de régulation. Ils contribuent collectivement à l'essor de l'exploration spatiale. Les nouvelles approches économiques, les modèles de services innovants comme le partage d'un lanceur par un grand nombre de satellites, le partage d'une nanosat par les charges utiles de plusieurs clients et la collaboration au sein des communautés ouvertes (*open source*) sont des éléments clés de cette dynamique. Cette approche permet ainsi de réduire drastiquement le coût de lancement par kilogramme.

Les universités participent également à la dynamique *New Space* en formant les techniciens et ingénieurs qui feront carrière dans l'industrie astronautique. Plusieurs formations existent aujourd'hui en France, en Europe et dans le monde. Nous pouvons citer l'ISAE SupAero et l'ensemble du groupe ISAE et l'École de l'Air et de l'Espace qui sont des acteurs phares dans la formation en France. L'International Space University (ISU) qui est située à Strasbourg est un acteur de renommée internationale dans la formation au milieu spatial en général.

Une douzaine d'universités et écoles d'ingénieurs françaises ont établi des Centres spatiaux universitaires (CSU) dans le but de guider les étudiants vers une carrière dans l'industrie spatiale au travers du domaine émergent du *New Space*. Ces centres privilégient une approche pédagogique axée sur des projets concrets, impliquant le développement de missions nanosatellites en collaboration avec des chercheurs de laboratoires de recherche. Le financement de ces missions provient d'appels à projets ainsi que du mécénat d'entreprises géré par les fondations des établissements universitaires. Elles collaborent entre elles et avec le Cnes qui a développé le programme spécifique Nano-Lab-Academy dans le but d'accélérer le développement des missions des CSU.

CONCLUSION

Les nanosatellites, grâce à leur taille réduite et à leur coût abordable, sont polyvalents et contribuent de manière significative à des domaines aussi variés que l'observation terrestre, la recherche scientifique spatiale et les télécommunications avancées. Les constellations de nanosats de télécommunication sont maintenant partie prenante de l'architecture des futurs réseaux 6G pour obtenir une couverture totale du globe terrestre sans aucune zone blanche.

L'industrie et les recherches sur les nanosatellites sont très dynamiques et prennent une part de plus en plus grande dans les manifestations internationales comme l'International Astronautical Congress (IAC). Cependant, de nombreux défis doivent être traités par les acteurs du *New Space* incluant les agences spatiales, les gouvernements et les régulateurs.

La multiplication des lancements entraîne rapidement une accumulation de débris et de satellites non fonctionnels ou non manœuvrables en orbite. Ceux-ci persistent en orbite

pendant plusieurs années, voire des décennies, ce qui augmente le risque de collision avec d'autres satellites. Les agences spatiales lancent des programmes de recherche visant à sécuriser le trafic des objets en orbite et à mettre en place des mesures pour « nettoyer » l'orbite terrestre des débris spatiaux. Certains opérateurs de lanceurs exigent désormais des opérateurs de satellites qu'ils démontrent la capacité de désorbitation de leurs satellites en moins de 5 ans, notamment par l'intégration de sous-systèmes de propulsion.

L'augmentation de la densité en orbite basse génère une demande croissante en communication radiofréquence. Les opérateurs de nanosatellites sont de plus en plus en concurrence pour l'utilisation des fréquences radio spatiales, entraînant ainsi une multiplication des interférences lors des transmissions.

Comme tout système informatique, le nanosatellite est exposé au risque des cyberattaques. Un défaut dans le logiciel embarqué du nanosatellite peut être exploité par des hackers privés ou gouvernementaux pour corrompre sa mission ou pour en prendre le contrôle et donc sa possession définitive. Des agences lancent des concours sur certains de leurs satellites comme le Hack-A-Sat de l'US Air Force pour découvrir les potentiels faiblesses. De plus, l'avènement des ordinateurs quantiques annonce des menaces pour les échanges sécurisés des satellites pour lesquels le logiciel de bord ne peut être mis à jour afin d'ajouter les nouveaux algorithmes cryptographiques résistants (aussi appelé Post-quantum Cryptography) en cours de standardisation par le NIST.