

Séance du 22 février 2021

## La recherche montpelliéraine sur les nano-satellites

**Laurent DUSSEAU**

Professeur à l'Université de Montpellier  
Directeur du Centre Spatial Universitaire de Montpellier  
Directeur de la Fondation Van Allen

---

### MOTS-CLÉS

Espace, nano-satellites, satellites, cubsat, new space, centre spatial universitaire, Montpellier

### RÉSUMÉ

Initialement conçus comme des objets permettant d'initier les étudiants à l'ingénierie spatiale, les nano-satellites sont aujourd'hui au cœur d'enjeux économiques importants. Pionnière en France dans ce domaine, l'Université de Montpellier (UM) a lancé le premier nano-satellite français ROBUSTA-1A. ROBUSTA-1B a pris le relai en juin 2017. Toujours opérationnel à ce jour, ses retombées scientifiques sont loin d'être négligeables. En 2022 il sera rejoint dans l'espace par CELESTA et MTCUBE2 et ROBUSTA-3A Méditerranée, alors que trois autres nano-satellites sont en cours de développement au Centre Spatial Universitaire de l'UM (CSUM) avec le soutien de la fondation Van Allen et de plusieurs grandes entreprises du spatial. Le CSUM est installé, depuis 2016, dans un bâtiment de 2300 m<sup>2</sup> abritant également plusieurs entreprises leaders du domaine. Cette aventure a permis à plus de 500 étudiants de se former et de trouver un emploi, faisant de Montpellier la capitale française des nano-satellites.

---

### KEY WORDS

Space, nano-satellites, satellites, cubsat, new space, university space center, Montpellier

### ABSTRACT

Initially conceived as objects to introduce students to space engineering, nano-satellites are now at the heart of important economic issues. A pioneer in France in this field, the University of Montpellier (UM) launched the first French nano-satellite ROBUSTA-1A. ROBUSTA-1B took over in June 2017 and is still operational. Its scientific benefits are far from negligible. In 2022, it will be joined in space by CELESTA, MTCUBE2 and ROBUSTA-3A Mediterranean, while three other nano-satellites are being developed at the UM University Space Centre (CSUM) with the support of the Van Allen Foundation and several major space companies. Since 2016, the CSUM has been housed in a 2300 m<sup>2</sup> building that also houses several leading companies in the field. This adventure has enabled more than 500 students to receive training and find employment, and has made Montpellier the French capital of nano-satellites.

---

## 1. Le pedigree des nano-satellites

### Une niche dans l'évolution

En 1879, Ernst HEACKEL publie un document intitulé « le pedigree de l'homme ». Il s'agit d'une planche sur laquelle HEACKEL dessine un chêne dont chacune des nombreuses branches mène à une espèce animale, actuelle ou éteinte. On y trouve des géants comme les dinosaures, les éléphants, les gorilles et, bien entendu, au sommet, il place l'homme. Mais, sur une petite branche, apparaît la souris, dont on peut également dire qu'en dépit de sa petite taille, elle a su trouver sa niche dans l'évolution. La souris est-elle moins importante dans l'évolution que l'éléphant ?

Considérons à présent le pedigree des satellites. Tout a commencé en 1957 par le lancement de sputnik et quelques années plus tard, par celui du premier satellite français, Astérix. Depuis, l'arbre généalogique des satellites a poussé pour aboutir à des géants comme Hubble et les SATCOMS ou à des merveilles de technologie qui percent les secrets de l'univers et nous renseignent sur les bouleversements que subit notre planète : Gaya, Sentinel, ou les Pléiades. Tout comme la souris a su trouver sa place à côté de l'éléphant, de petits objets, appelés nano-satellites, occupent désormais une niche particulière dans ce nouveau paradigme spatial que l'on nomme le « New Space ». S'ils ne remplaceront jamais les colosses de l'espace, ils sont pourtant susceptibles de rendre bien des services.

### La naissance des CubeSats

À la fin ses années 90, deux universitaires américains, Bob Twiggs et Jordi Puig-Suari, se demandent comment attirer les jeunes vers les Sciences et Technologies. L'espace semble une bonne piste. À cette époque, on ne parle pas encore de "New space". Deux problèmes sont identifiés : le coût des projets, les lancements. La vision de Twiggs et Puig-Suari tient en quelques points :

Le CubeSat sera léger : le Nano-satellite devra peser entre 1 et 10 kg. Son coût sera compatible avec un budget universitaire. Sa forme sera standard : un cube 1U de 10cm d'arête pour permettre des lancements groupés en "Piggy back" (dos de cochon) dans des dépoyeurs standardisés. Les Cubesats seront nombreux. À l'instar des smartphones, ils seront un moteur pour l'innovation.

Leur réponse : le CubeSat Design Specification (CDS), document définissant un standard suffisamment contraignant pour assurer des lancements groupés dans des dépoyeurs standardisés, mais suffisamment ouvert pour permettre l'innovation à travers une libre interprétation. Le CDS s'accompagne du P-POD, premier système de déploiement standardisé (CAL POLY) pour CubeSat.

La forme choisie pour la brique de base, un cube de 10cm d'arête, correspond à ce que l'on appelle communément le Cubesat 1U. En doublant ou triplant la longueur des arêtes on obtient des nano-satellites dits 2U ou 3U. Aujourd'hui, les applications se tournent vers des structures 6U ou 12U pour des missions qui n'ont plus rien à envier aux gros satellites.

### CubeSats d'aujourd'hui et de demain

Tout comme les premiers téléphones portables ont évolué vers des smartphones, dont les nombreuses fonctions reposent sur une électronique ultra performante, les nano-satellites ont également bénéficié de quelques avancées technologiques majeures :

- la micro-électronique, que ce soit pour les capacités de calcul embarqué pour gérer l'énergie, l'attitude<sup>1</sup> et le stockage massif de données à bord.
- les nouvelles générations de cellules solaires multi jonctions dont le rendement est trois fois supérieur à celui des cellules en silicium polycristallin, permettant de générer une énergie suffisante pour assurer des missions complexes.
- les batteries Lithium-ion, dont les capacités peuvent atteindre 45 Ampères-heures par kilogramme, permettent désormais de stocker cette énergie pour une utilisation en éclipse tout en conservant un encombrement minimum.

En 2021, les nano-satellites ne sont plus seulement des outils pour la formation des jeunes. Ils peuvent communiquer entre eux et voler en formation. Ils forment des constellations qui donnent une vision « globale » à tout instant. Ils ont même accompagné les sondes martiennes du JPL (MARCOS). Ils sont une composante essentielle du NEW SPACE.

### **Le New Space, un nouveau contexte**

On désigne par New Space une nouvelle approche de l'accès à l'espace, issue du secteur privé par opposition aux agences. Initié par les Lanceurs (SpaceX, Virgin Galactic, Blue Origin, ...) le new space a vu l'émergence de constellations de nano / micro-satellites (Planetlabs, Starlink, OneWeb...)

La fabrication de ces nano ou micro-satellites s'inspire des méthodes issues de l'aéronautique, voire de l'automobile, et se caractérise par une production industrielle, en petites séries et une fiabilité assurée non plus au niveau satellite, mais au niveau système : les satellites défaillants au sein d'une constellation sont aussitôt remplacés par des satellites en réserve.

Les applications sont tournées vers les services et la rentabilité souvent assurée par les retombées économiques « terrestres ». Alors que les projets de constellation se multiplient, il est légitime de se demander quel sera leur impact sur l'environnement, la pollution lumineuse et les débris spatiaux, véritable challenge pour l'espace de demain. Il est également important de noter que les nano-satellites, dont la capacité d'emport et l'énergie à bord sont limitées, ne remplaceront jamais les « gros ». Ils sont, en particulier, incompatibles avec l'observation de la Terre ou de l'Univers, qui nécessite des instruments de grandes dimensions. Leur intérêt scientifique réside dans leur capacité à faire des mesures multipoints, pour réaliser une cartographie dynamique des ceintures de radiations, pour la météo spatiale, l'étude du réchauffement climatique. Ils offrent la possibilité de réaliser des missions précurseuses, en tant que compagnon de satellites ou de sondes. Compte tenu de leur faible coût, ils peuvent être sacrifiés dans le cadre de missions suicide, dans les ceintures de Van Allen par exemple. Côté services, nombreux sont ceux qui leur prédisent un bel avenir dans l'internet des objets.

### **Les CubeSats, des débris ?**

Avec la problématique des constellations de nano-satellites, se pose également la question de leur retrait en fin de vie. Que deviennent ces petits objets, à l'heure où les débris font peser sur l'accès à l'espace une menace avérée ? La charte sur les débris spatiaux, impose le retrait des zones dites « protégées », à savoir l'orbite LEO (Low Earth Orbit) et l'orbite Géostationnaire, en moins de 25 ans. La Loi française sur les opérations spatiales, reprend ces dispositions. Afin de répondre à cette exigence, les CubeSats, sont généralement injectés sur une orbite LEO, suffisamment basse pour que

---

<sup>1</sup> L'attitude d'un satellite désigne son orientation dans l'espace.

la trainée atmosphérique réduit progressivement leur vitesse orbitale. Ils descendent alors, d'abord imperceptiblement, puis, de plus en plus vite, jusqu'à se consumer entièrement lors de la rentrée atmosphérique. L'arrivée sur le marché de minuscules propulseurs électriques devrait permettre soit un maintien à poste prolongé sur les orbites très basses, soit une désorbitation en fin de vie. À ce jour, les collisions entre gros satellites hors de contrôle et les explosions d'étages de lanceurs constituent la principale source de débris. Ici encore, les nano-satellites pourraient avoir un rôle à jouer pour la détection et la détermination des trajectoires des gros objets non collaborant.

## 2. Les Satellites du Clapas

### Une école de persévérance

Le spatial est une école de persévérance ; l'échec en fait partie. Il est aussi fait de moments magiques, lorsqu'un lancement réussit ou que l'on entend le premier signal du satellite. L'aventure des nano-satellites à Montpellier commence en 2001 lorsque Monsieur Michel Courtois, alors directeur technique d'Alcatel Space, propose aux chercheurs du groupe "RADIAC" de l'IES (Institut d'Électronique et des Systèmes de l'Université de Montpellier), d'embarquer une charge utile sur SACRED, un CubeSat de l'Université d'Arizona. SACRED sera perdu au lancement, en 2006, dans l'explosion du lanceur Dnepr. Premier échec, première déception. La même année, l'équipe trouve l'occasion de rebondir avec l'appel à projet EXPRESSO du CNES. Le projet montpelliérain, un nano-satellite ayant pour mission d'étudier l'effet des radiations sur les composants électroniques, est retenu : le premier CubeSat Français s'appellera ROBUSTA et sera lancé en février 2012, lors du vol inaugural de la fusée VEGA. Victime d'un défaut de fabrication sur un générateur solaire, ROBUSTA n'émettra que quelques jours. Ce défaut corrigé, l'équipe lancera ROBUSTA-1B, en 2017. Toujours opérationnel en 2021, ROBUSTA-1B a déjà transmis quatre ans et demi de données en vol, prouvant l'intérêt que les nano-satellites peuvent avoir pour la science.

Dans l'intervalle entre les lancements de ces deux satellites, la filière nano-satellites française s'est structurée. Dès 2011, l'Université de Montpellier crée le premier Centre Spatial Universitaire français, le CSUM (Centre Spatial Universitaire de Montpellier) adossé, dès 2012, à la Fondation Van Allen. Sur ce modèle, et avec l'appui du programme Janus du CNES, d'autres CSU voient le jour, partout en France. Aujourd'hui, le CSUM est une plateforme technologique pour la recherche de l'Université de Montpellier, qui compte une vingtaine d'ingénieurs et encadre une cinquantaine d'étudiants en stage par an sur ses différents projets, dont certains dans le cadre de collaborations internationales. Avec une salle propre ISO8 de 200 m<sup>2</sup>, une enceinte vide thermique, un centre de contrôle et trois stations sol UHF, VHF et bande-S, le CSUM est doté de tous les équipements nécessaires pour mener des missions depuis les phases 0/A (définition/faisabilité) jusqu'aux opérations en vol.

### Des choix initiaux ambitieux

Ces CubeSats sont donc 100% montpelliérains et entièrement conçus, fabriqués et opérés à l'UM. Cette approche, a permis de développer une technologie propre, s'appuyant sur l'innovation financée par la fondation Van Allen et la Région Occitanie et ayant donné lieu à plusieurs transferts de technologie vers des entreprises partenaires. Une telle stratégie permet de maîtriser totalement la propriété intellectuelle et de produire

des nano-satellites avec des coûts récurrents relativement faibles en petite série. En revanche, elle demande un investissement lourd et des temps de développement longs.

### **Les missions nano-satellites du CSUM**

Les nano-satellites montpellierains sont issus d'un groupe de recherche de l'Institut d'Électronique et des Systèmes étudiant l'effet des radiations sur les composants électroniques. C'est donc dans ce domaine que les premières missions du CSUM se sont orientées.

Pour mémoire, nous rappellerons que les satellites, qui traversent les ceintures de radiations, les fameuses ceintures de Van Allen, sont soumis à des radiations ionisantes intenses qui dégradent les matériaux et l'électronique embarquée. Les spécialistes classent ces effets en deux grandes catégories : (1) les effets cumulatifs, comme la Dose totale Ionisante et la Dose de déplacement, qui affectent les caractéristiques des composants par un dépôt d'énergie continu tout au long de la mission, et (2) les effets singuliers, destructifs (SEL) ou non (SEU), ou encore fonctionnels (SEFI), liés au passage d'une particule unique au cœur d'un composant CMOS. Robusta 1A et 1B avaient pour mission d'étudier les effets des radiations sur les composants analogiques. MTCUBE 1 & 2 ont pour mission d'étudier les taux d'erreurs dus à des événements singuliers sur des mémoires en technologies avancées. CELESTA, réalisé en partenariat avec le CERN à Genève, emportera une version compacte du moniteur de radiations utilisé dans le LHC (Large Hadron Collider ou grand collisionneur de hadrons), et les expériences. ROBUSTA-1B, lancé en 2017 et toujours fonctionnel, a déjà transmis, après plus de quatre ans, des données scientifiques qui mettent en avant une forte corrélation entre la dégradation cumulative des composants sous test et l'activité solaire. L'ensemble des données recueillies fera l'objet d'une publication dans une revue scientifique.

Ces dernières années, sous l'impulsion du conseil d'administration de la Fondation Van Allen, qui soutient le CSUM, les missions se sont orientées vers des problématiques d'avantage liées aux thématiques environnementales et sociétales. Le projet Robusta 3-A Méditerranée, en particulier, est né de la rencontre entre le CSUM et les acteurs du projet GEMMOC (GNSS Embarqué en pleine Mer pour la Météorologie et la Climatologie) qui a pour objectif d'étudier et d'améliorer les méthodes pour la restitution des contenus intégrés en vapeur d'eau, précurseurs des épisodes méditerranéens violents, aussi appelés épisodes Cévenols. Ce projet se heurtait à l'absence de mesure en haute mer, là où se forme, justement, la vapeur d'eau dans la troposphère. L'idée a donc germé d'embarquer des détecteurs GNSS sur des navires de commerce, avec le soutien du port de Sète, et de réaliser des mesures en Méditerranée occidentale. Le CSUM et la fondation Van Allen contribuent, en développant ROBUSTA-3A, un CubeSat 3U démonstrateur technologique indépendant et robuste pour la collecte et la transmission de données. Le système développé devrait permettre la fourniture, aux partenaires, de fichiers RINEX dont la fraîcheur sera compatible avec une assimilation horaire dans les modèles de Météo France. De par son caractère éducatif, impliquant de nombreux étudiants, ce projet a obtenu le soutien du Centre National d'études Spatiales à travers les programmes *JANUS*, puis *Nanolab Academy*.

Enfin, le projet ENSO, réalisé en partenariat avec la société EXPLEO et l'agence spatiale Sud-Africaine (SANSa), a pour objectif de calibrer les radars HF situés en Antarctique et dédiés à l'étude de l'ionosphère. ENSO, Robusta-3a, MTCUBE-2 et CELESTA devraient être lancés en 2022, ainsi que DJIBOUTI-1A, premier satellite de l'agence spatiale djiboutienne, également réalisé au CSUM, et dont le contexte est détaillé dans ce qui suit.

### Besoin des pays émergents

Les nano-satellites permettent un accès à l'espace dans des pays émergents désireux de se doter d'une capacité spatiale à moindre coût. Outre l'indépendance nationale et les applications visées, il s'agit souvent de créer une activité économique nouvelle, génératrice d'emplois et de revenus, permettant de garder les jeunes diplômés dans le pays d'origine. Parmi les motivations énoncées, reviennent souvent la nécessité d'apporter une solution pérenne à certains enjeux de santé, d'agriculture, de réchauffement climatique, de sécurité et ce, de façon indépendante. Du point de vue géopolitique, il s'agit également de se positionner au sein de l'Agence Spatiale Africaine avec l'émergence d'agences nationales, animées par une volonté d'acquérir la compétence plutôt que d'acheter des systèmes clé en main, en formant en nombre, des cadres et des techniciens. Grâce au CSUM, l'Université de Montpellier est en mesure de répondre, en proposant un programme complet incluant la formation des étudiants à Bac+3 (Lpro AIT) et Bac+6 (Mastère Spécialisé des grandes écoles) et l'assistance à la construction et au lancement d'un ou plusieurs nano-satellites.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le partenariat entre l'Université de Montpellier et le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (MENSUR) de Djibouti. Dès 2020, dix étudiants djiboutiens ont suivi les formations proposées en collaboration avec le CSUM et ont construit Djibouti-A et 1B, deux CubeSats dont le lancement est prévu respectivement pour 2022 et 2023.

### 3. Conclusion

Les nano-satellites ont fait irruption dans le paysage international, à la fin des années 1990, mais n'ont réellement été pris au sérieux en France que depuis quelques années, avec l'avènement du New Space.

Le CNES, à travers l'initiative Forum Nano, tente aujourd'hui de fédérer les acteurs et de créer une filière industrielle française pour répondre à la concurrence internationale. Le CSUM et la Fondation Van Allen, ont œuvré en ce sens, depuis 2011 (création du CSUM) et bien avant, avec SACRED (2001) et ROBUSTA-1A (2006). En dix ans d'existence, le CSUM et la Fondation Van Allen ont permis de former plus de 800 étudiants pour répondre aux besoins en ressources humaines de leurs partenaires et membres fondateurs. Trois formations ont été créées ainsi que 70 emplois directs à Montpellier. Trois satellites ont été lancés. Cinq autres lancements sont prévus en 2022. Avec l'ouverture à l'international, gageons que l'histoire des nano-satellites du Clapas ne fait que commencer.

Nota : À cause du confinement sanitaire dû à la Covid 19, cette présentation a été faite en visio-conférence.