

Les hallucinogènes dans le cerveau

Les recherches sur le mode d'action des hallucinogènes diffèrent selon qu'elles portent ou non sur des êtres humains. Comme le rappellent R. Griffiths et C. Grob, la recherche chez l'homme s'est longtemps arrêtée. Elle a repris au début des années 1990, afin de relier les manifestations cognitives et les effets neurobiologiques des psychédéliques. Depuis plus de dix ans, trois équipes sont actives en Europe : le centre de recherche Heffter de Franz Vollenweider à Zurich (psilocybine), l'équipe d'Euphrosyne Gouzoulis-Mayfrank à l'Université de Cologne (mescaline, psilocybine, DMT) et celle de Jordi Riba à l'Hôpital Santa Creu i Sant Pau de Barcelone (ayahuasca).

Les techniques d'imagerie cérébrale et d'électroencéphalographie utilisées par ces chercheurs ont produit des résultats convergents quant au mode d'action des hallucinogènes : une activation du cortex préfrontal (impliqué dans l'intégration cognitive, affective et sensorielle et le contrôle de l'action), du cortex cingulaire antérieur (qui participe à la détection et à l'évaluation des erreurs, à la résolution de conflits sensoriels et à la conscience émotionnelle) et du cortex insulaire (qui lie les sensations corporelles internes aux émotions et évalue la douleur). Des diminutions d'activité dans le cortex occipital (de la perception visuelle) et les voies visuelles sont aussi enregistrées.

De son côté, la recherche fondamentale (*in vitro* ou sur des animaux) a progressé sans interruption depuis 1953, après que le pharmacologue anglais John Gaddum (1900-1965) a montré que la molécule de LSD ressemble à celle de la sérotonine, et qu'elles interfèrent dans l'organisme. Dès lors, non seulement les chercheurs tentent de comprendre le mode d'action des psychédéliques,

mais ils les utilisent aussi quand ils étudient la sérotonine, l'interêt pour ce neuromédiateur n'ayant cessé de croître. Alors, comment agissent les hallucinogènes dans le cerveau ?

Chez l'animal, les chercheurs utilisent deux types de dispositifs pour identifier les effets des psychédéliques. Lors de tests de discrimination de drogues, les réactions comportementales des rongeurs diffèrent selon la substance consommée. Ce dispositif permet de montrer dès le début des années 1980 que l'action commune et principale des psychédéliques est d'activer les récepteurs 2A de la sérotonine (on dit que ce sont des agonistes des récepteurs 2A de la sérotonine, ou plus brièvement des agonistes 2A). Ce résultat a été confirmé chez l'homme en 1998 : un antagoniste des récepteurs 2A bloque l'essentiel des effets de la psilocybine.

La tête qui tourne

Un autre type de dispositif expérimental mesure des « indices comportementaux » témoignant de l'activation des récepteurs 2A par les psychédéliques. Par exemple, les souris réagissent à la drogue en secouant rapidement la tête. Cet indice est peu spécifique, car les mouvements de la tête sont aussi observés après administration d'un précurseur de la sérotonine, mais il est considéré comme fiable. Il a été utilisé récemment pour tenter de résoudre une énigme ancienne : si tous les psychédéliques classiques sont des agonistes 2A, pourquoi tous les agonistes 2A ne sont pas des psychédéliques ?

En général, un récepteur transmembranaire, tel le récepteur 2A, est lié à une cascade spécifique d'événements intracellulaires, la voie de signalisation. Quand un ligand provoque une réaction équivalente

à celle de la sérotonine, le ligand est un agoniste. Si la réaction est moindre, c'est un agoniste partiel. Quand il bloque la signalisation, on a affaire à un antagoniste. Et si l'activité spontanée est diminuée, c'est un agoniste inverse.

Multiples effets

Or l'hypothèse dégagée des travaux récents est que les récepteurs 2A peuvent adopter plusieurs configurations dont les fonctions sont distinctes ; et chacune d'elles implique une voie de signalisation donnée. En outre, chaque ligand engendre une configuration particulière du récepteur. Ainsi, le groupe de Stuart Sealton et de Javier González-Maeso, à l'École de médecine de Mount Sinai à New York, a montré avec des souris transgéniques que le LSD stabilise une configuration fonctionnelle des récepteurs 2A différente de celle engendrée par le lisuride, un analogue du LSD qui active les récepteurs 2A sans effets notables sur la conscience des êtres humains.

Complicant encore la situation, ils ont aussi mis en évidence sur des neurones corticaux une association fonctionnelle étroite des récepteurs 2A avec les récepteurs mGlu2 du glutamate, le neurotransmetteur exciteur le plus répandu dans le cerveau. Dans ce complexe 2A/mGlu2, les récepteurs interagissent, chacun modifiant les fonctions de l'autre. Ainsi, la suppression du récepteur mGlu2 chez des souris transgéniques abolit les effets du LSD sur la voie de signalisation du récepteur 2A et sur l'indice comportemental associé (disparition des secousses de la tête).

Frédéric Bois-Mariage

est chercheur en neuropharmacologie, psychologie clinique et ethnologie

peuvent effectivement aider les patients à surmonter leur dépendance. Par exemple, nous avons commencé une étude pilote sur le sevrage tabagique ; les participants reçoivent de la psilocybine en complément d'une thérapie cognitivo-comportementale, qui enseigne aux patients comment changer leurs pensées et leurs comportements pour arrêter de fumer et rester abstinentes.

En outre, certaines équipes testent si la psilocybine peut soulager les symptômes des troubles obsessionnels compulsifs. D'autres substances, ayant des mécanismes d'action différents, présentent aussi un potentiel thérapeutique. Par exemple, la kétamine, normalement utilisée comme anesthésique, traiterait, quand elle est utilisée en faibles doses, la dépression plus rapidement que des antidépresseurs classiques, tel le Prozac. Des chercheurs en Caroline du Sud ont aussi montré que la MDMA soigne efficacement le trouble du stress post-traumatique chez des patients pour lesquels les thérapies habituelles avaient échoué. D'autres essais cliniques avec la MDMA sont en cours en Suisse et en Israël.

Des expériences bien encadrées

Mais ces thérapies avec les hallucinogènes ne seront acceptées que si l'on tire les leçons des « psychédéliques » des années 1960. Parfois, les hallucinogènes provoquent anxiété, paranoïa ou panique. Dans des contextes non contrôlés, cela peut conduire à des accidents ou au suicide. Dans nos études, même après une sélection rigoureuse des volontaires et au moins huit heures de préparation avec un psychologue clinique, environ un tiers des patients ont vécu des épisodes d'angoisse, et environ un cinquième s'est senti paranoïaque pendant l'expérience. Mais au centre de recherche, grâce à la présence permanente de personnes spécifiquement entraînées pour réaliser ce type d'expériences, aucun des participants n'a eu d'effets indésirables durables.

Les autres risques liés à la consommation d'hallucinogènes sont une psychose prolongée (des troubles de la personnalité), une détresse psychologique (une diminution du bien-être) ou des troubles de la vision ou des autres sens, qui peuvent durer quelques jours, voire davantage. Ces effets sont rares, notamment chez

des volontaires sélectionnés avec soin et préparés psychologiquement.

Si les hallucinogènes sont parfois consommés comme stupéfiants, ils ne sont pas considérés comme des drogues « addictives », car ils ne déclenchent pas la consommation compulsive de drogues ni de syndrome de manque. Toutefois, nous avons publié des directives de sécurité pour la réalisation d'études scientifiques impliquant de grandes quantités d'hallucinogènes. Étant donné les capacités des chercheurs à prendre en charge les risques associés aux drogues, nous pensons que les études avec les hallucinogènes doivent continuer, car ces substances peuvent améliorer la vie de patients dépendants à une substance ou atteints de cancer. Et si les hallucinogènes se révèlent efficaces dans ces cas, il faudrait voir s'ils peuvent être associés à d'autres thérapies, par exemple pour soulager les troubles alimentaires, les comportements sexuels à risques et divers comportements inadaptés.



© Shutterstock/Yellow

3. LES CHAMPIGNONS hallucinogènes appartiennent à l'ordre des *Agaricales* (comme le champignon de Paris). Ces « bonnets de lutin » (*Psilocybe semilanceata*) sont la seule espèce du genre *Psilocybe* présente en Europe. Ils contiennent une molécule psychoactive, la psilocybine (qui représente 0,4 pour cent de leur poids).

En outre, peut-être pourrait-on développer des protocoles non pharmacologiques ayant des effets plus rapides et plus efficaces que les pratiques spirituelles traditionnelles, tels la méditation et le jeûne, qui engendrent des états de conscience modifiés et des changements comportementaux. C'est d'ailleurs ce genre d'expérience qui avait convaincu Bill Wilson, de l'Hôpital Towns à New York, d'arrêter de boire et de fonder les Alcooliques anonymes dans les années 1930.

Si des études complémentaires à grande échelle sont nécessaires pour déterminer les effets thérapeutiques des hallucinogènes, les résultats récents sont prometteurs. Mais une question reste en suspens : quels sont les mécanismes d'action des hallucinogènes ? Les techniques d'imagerie cérébrale et de pharmacologie devraient y répondre (voir l'encadré page ci-contre). Voir les régions cérébrales impliquées dans les émotions intenses et les pensées des personnes sous l'influence des hallucinogènes permettrait de mieux comprendre la physiologie des états modifiés de conscience. ■



Et tout s'éclaire



La marche des sciences
14h/15h jeudi

avec Aurélie Luneau

en partenariat avec le magazine Pour la Science

franceculture.com



L'ESSENTIEL

- ✓ Les CubeSats sont des satellites standardisés de un kilogramme et dix centimètres de côté, lancés en même temps que d'autres missions.
- ✓ Moins coûteux et plus rapides à développer que les satellites classiques, ils offrent aux universités, aux États ou même aux amateurs la possibilité de lancer une mission spatiale.
- ✓ Les études en cours et envisagées sont nombreuses, de la physique atmosphérique aux expériences en microgravité.

Montana State University, Space Science and Engineering Laboratory

Depuis que *Sputnik* a inauguré l'ère des satellites artificiels, il y a plus de 50 ans, les grandes institutions ont dominé le ciel. La plupart des milliers de satellites en orbite autour de la Terre sont le fruit d'énormes projets financés par des gouvernements ou des corporations. Pendant des décennies, chaque génération de satellites a été plus sophistiquée et plus chère que la précédente, nécessitant une infrastructure coûteuse d'installations de lancement, de stations de surveillance, de spécialistes de mission et de centres de recherches.

Ces dernières années, cependant, les progrès de l'électronique, de l'énergie solaire et d'autres techniques ont permis de réduire drastiquement la taille des satellites. Un nouveau type de satellite, nommé CubeSat, est ainsi développé dans diverses régions du globe : petit (c'est un cube de dix centimètres de côté), compact, il simplifie et standardise la conception de

petits engins spatiaux, et ramène les coûts de développement, de lancement et d'exploitation d'un satellite à moins de 70 000 euros, soit une infime fraction du budget d'une mission de la NASA ou de l'Agence spatiale européenne.

L'idée est de donner aux développeurs de satellites des caractéristiques standards de taille et de poids, afin que plusieurs CubeSats (mis au point chacun par un groupe différent de scientifiques, d'étudiants, d'ingénieurs) puissent être combinés en une seule charge utile de fusée – un unique bloc transporté. Greffée sur une autre mission plus coûteuse ayant un peu de place à partager, la charge de CubeSats est ensuite mise en orbite à moindre frais, le coût du lancement de la fusée étant réparti entre les différents participants. Les normes de conception du CubeSat permettent en outre aux participants de partager leur savoir-faire et d'acheter des composants du commerce.

À chacun son SATELLITE

Alex Soojung-Kim Pang et Bob Twiggs

Grâce à de minuscules satellites standardisés,
les expériences spatiales sont à la portée des équipes
de recherche les plus petites.

Plus d'une vingtaine de CubeSats ont été lancés avec succès. Conçus par des scientifiques des États-Unis, d'Asie, d'Europe ou d'Amérique du Sud, ils ont effectué diverses missions allant de la recherche biomédicale en microgravité aux études de la haute atmosphère. Leur popularité est croissante : de faible coût, de développement rapide et portés par une communauté internationale d'utilisateurs passionnés, ils représentent un outil pédagogique idéal pour les universités. Des équipes universitaires – souvent constituées principalement d'étudiants et de doctorants – ont vu le jour dans le monde entier pour s'y consacrer. Les CubeSats offrent aussi à des petits pays, des jeunes pousses et même des équipes de lycée, la possibilité de développer leurs propres programmes spatiaux. Les coûts de lancement pourraient bientôt se réduire à 7000 euros, assez bas pour que les amateurs soient intéressés. Les CubeSats sont en passe de produire, dans le domaine

spatial, le même effet que l'*Apple II* en informatique il y a 30 ans : une révolution due à la démocratisation d'une technologie connue, mais jusqu'alors inaccessible.

Des satellites de un kilogramme

De petits satellites de quelques kilogrammes existent depuis les débuts de l'ère spatiale ; *Sputnik 1* lui-même pesait à peine plus de 80 kilogrammes. Mais à mesure que les fusées ont gagné en puissance, les satellites sont devenus plus gros et complexes, à tel point qu'aujourd'hui, un satellite de communications ou de recherche pèse plusieurs tonnes.

Parallèlement, les « microsatellites » (d'un poids compris entre 10 et 100 kilogrammes) ont été marginalisés, mais sans jamais disparaître. Par exemple, des spécialistes de l'atmosphère en ont envoyé explorer la thermosphère, la couche atmos-

phérique qui s'étend de 80 kilomètres au-dessus de la surface terrestre à 600 kilomètres environ ; et depuis le début des années 1960, nombre de satellites de communications OSCAR (*Orbiting Satellite Carrying Amateur Radio*, satellite orbital radioamateur) ont été conçus par des clubs d'amateurs issus d'universités, d'écoles d'ingénieurs ou de l'industrie spatiale pour faciliter la communication des radioamateurs.

L'intérêt pour les petits satellites a commencé à croître dans les années 1980, grâce

1. VUE D'ARTISTE DU CUBESAT *Explorer-1 [Prime]* de l'Université de l'État du Montana. Embarqué le 4 mars dernier sur la fusée *Taurus XL* de la NASA, ce petit satellite devait étudier la ceinture de Van Allen, une zone riche en particules de haute énergie qui entoure la Terre. Mais à cause d'un incident technique, la fusée n'a pu atteindre une vitesse suffisante pour placer le satellite en orbite. À plus de 550 kilomètres d'altitude, il est retombé sans avoir pu transmettre de signal. Une copie du satellite devrait être lancée dès octobre prochain.

LES AUTEURS



Alex SOOJUNG-KIM PANG, docteur en histoire des sciences de l'Université de Pennsylvanie, est membre associé de la *Saïd Business School* de l'Université d'Oxford, en Angleterre. Bob TWIGGS, professeur à l'Université d'État de Morehead, dans le Kentucky, aux États-Unis, est l'un des créateurs du concept de CubeSat.

à la miniaturisation électronique et au développement des techniques de précision et de systèmes microélectromécaniques (notamment les minuscules accéléromètres que l'on trouve aujourd'hui dans de nombreux appareils, des *iPhone* aux airbags).

Dès la fin des années 1990, il semblait possible de créer des satellites fonctionnels ne pesant qu'un kilogramme, avec une taille qui réduirait les coûts de développement et de lancement et encouragerait les développeurs à concevoir de nouveaux types de missions. La NASA elle-même a encouragé les ingénieurs à proposer des approches meilleur marché de la science spatiale.

C'est dans ce contexte que l'un d'entre nous (Bob Twigg, alors à l'Université de Stanford) et Jordi Puig-Suari, à l'Université polytechnique d'État de Californie, se sont rendu compte que le concept de petit satellite ne décollerait pas sans un minimum de standardisation et sans partage des savoir-faire : il fallait suivre l'exemple des logiciels libres, qui avaient atteint à bon marché une notoriété mondiale simplement parce que leur code source était en libre circulation et améliorable par tous. C'est ainsi que les deux ingénieurs ont publié en 2000 le cahier des charges du CubeSat. Ce document de dix pages donne quelques recommandations simples : chaque unité doit être un cube de dix centimètres de côté (à un dixième de millimètre près) et donc occuper un volume de un litre. Par ailleurs, son poids ne doit pas dépasser un kilogramme. Les CubeSats peuvent également être rectangulaires, occupant le

volume de deux ou trois boîtes cubiques ; on parle alors de CubeSats 2U ou 3U (pour deux ou trois unités cubiques).

Un CubeSat est constitué d'un cadre métallique qui contient et protège l'électronique, les instruments, les systèmes de communications et d'alimentation. Les CubeSats sont en outre souvent équipés de panneaux solaires sur plusieurs côtés et d'une antenne extérieure ; certains seront sans doute bientôt dotés de systèmes de navigation rudimentaires, avec de minuscules tuyères capables de stabiliser l'attitude de vol de l'appareil et de l'orienter dans une direction donnée.

Des satellites conçus par des étudiants

Modulaires, les CubeSats sont lancés dans des châssis standards qui en contiennent plusieurs (à l'instar des bonbons dans un distributeur PEZ) et les éjectent une fois que la fusée a atteint l'orbite. En 2003, J. Puig-Suari a publié le plan d'un tel déployeur orbital, avec lequel il devenait possible de transporter et lancer en toute sécurité les CubeSats comme « passagers clandestins » sur les fusées lancées alors par les agences spatiales américaines et russes. La même année, l'entreprise *Pumpkin*, à San Francisco, a livré le premier kit commercial pour CubeSat – qui combine des composants prêts à l'emploi tels qu'une carte mère électronique, un cadre métallique, une batterie et des panneaux solaires – offrant un gain de temps aux scientifiques peu expérimentés en missions spatiales.

L'intérieur des CubeSats est aussi varié que les équipes qui les fabriquent. Ouvrez-en un et vous verrez un mélange de matériel aérospatial et de technologies disponibles dans le commerce ; des instruments scientifiques sur mesure ; du matériel recyclé de missions spatiales antérieures ; des équipements radio provenant de boutiques locales d'électronique ; ou du matériel informatique récupéré sur des micro-ordinateurs ou acheté sur *eBay*.

Depuis le début, les membres de la communauté CubeSat se sont appuyés sur l'expérience, les réussites et les astuces des uns et des autres ; les nouveaux arrivants apprennent vite que tout est mis en commun – hormis la charge utile du satellite, c'est-à-dire le matériel dédié à sa mission. Quand les développeurs font une découverte (un modèle de transmission pour



Spencer Lowell

2. DES CHERCHEURS DE L'UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE à Berkeley ont conçu *Cinema*, un CubeSat triple (3U) pour étudier les tempêtes magnétiques à l'aide de capteurs miniaturisés, de détecteurs de particules et de magnétomètres embarqués.

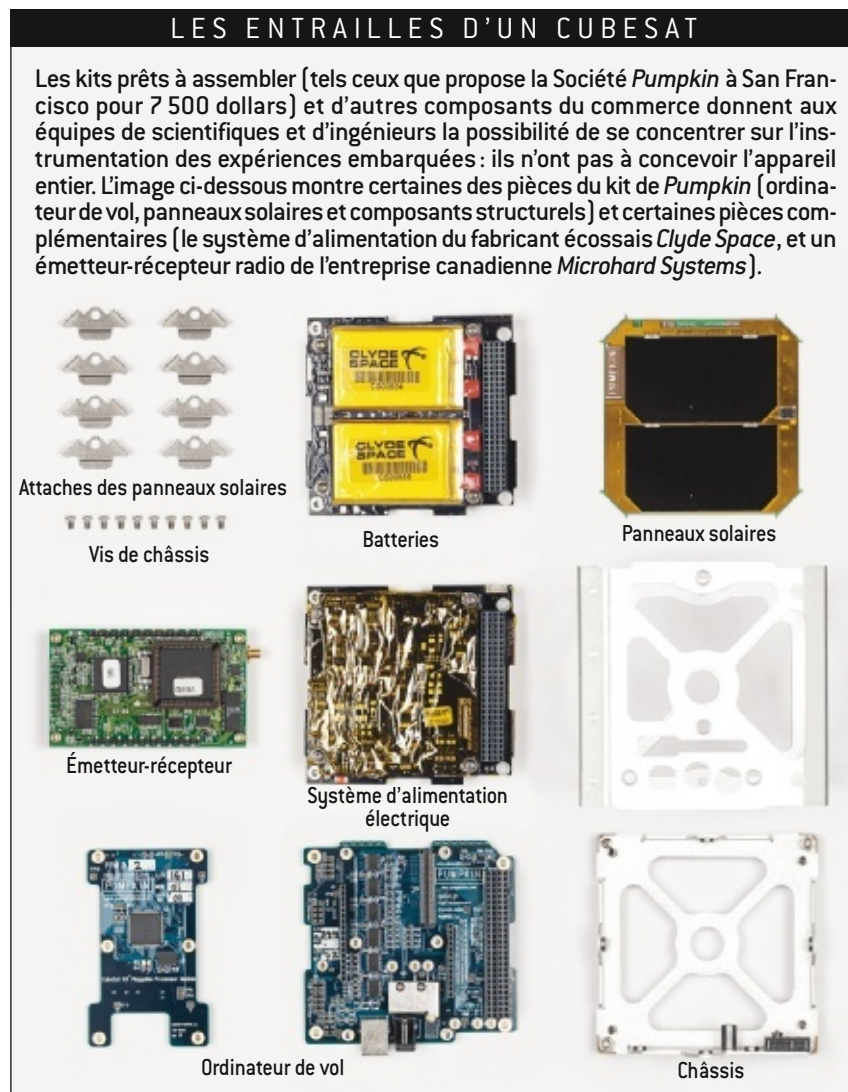
radioamateur qui fonctionne dans l'espace plus longtemps que les autres, par exemple), ils la partagent avec les autres concepteurs de CubeSats.

Nous nous sommes vite aperçus que les CubeSats intéressent les étudiants, et que ces derniers peuvent en tirer de nombreux enseignements. Les étudiants des programmes traditionnels de génie aérospatial travaillent sur des projets théoriques ou conçoivent de petites parties de gros systèmes qui rejoignent l'espace des années après la fin de leurs études. Un CubeSat, par contraste, est un objet que les étudiants peuvent tenir dans leurs mains. Il peut être construit par une équipe travaillant dans une seule pièce. Les étudiants peuvent créer des satellites fonctionnels en un ou deux ans, ce qui en fait des projets de thèse idéaux. Ils ont la responsabilité directe des projets CubeSat : même les étudiants de premier cycle peuvent être chefs de projet et spécialistes de mission, et la perspective d'envoyer le fruit de leur travail dans l'espace est une excellente motivation. Pour les enseignants, les CubeSats sont attrayants, car ils présentent tous les aspects d'ingénierie des grands satellites et offrent ainsi aux étudiants un moyen d'acquérir des bases solides et complètes sur leur conception.

Des expériences en microgravité

Ces dernières années, l'expérimentation sur CubeSat a rallié des scientifiques et des institutions de plus en plus variés. Les ingénieurs du secteur aérospatial et les astrophysiciens ont été rejoints par des professeurs et des étudiants d'autres domaines, et des entrepreneurs ont mis sur pied des compagnies offrant des services de lancement et un soutien. Des pays sans véritable programme spatial ont pu en démarrer un. La Suisse et la Colombie ont déjà lancé leurs premiers CubeSats, et plusieurs autres en préparent, telle l'Estonie. Avec les CubeSats, des programmes spatiaux voient même le jour à l'échelle de certains États des États-Unis. En particulier, le Kentucky a formé un consortium d'institutions académiques à but non lucratif pour bâtir une industrie du CubeSat.

Les premières missions à visée éducative étaient démonstratives : les « Beep-Sats », comme on surnommait ces premiers projets, transmettaient des signaux radio



pour confirmer qu'ils étaient fonctionnels et prouver que les petits satellites pouvaient communiquer avec des stations au sol. Depuis, l'état de l'art a évolué vers des objectifs scientifiques plus sérieux. La communauté CubeSat a aujourd'hui dépassé une « masse critique de missions réussies et importantes », note le technologue de la NASA Jason Crusan, et a désormais les moyens de répondre à ses détracteurs.

Les CubeSats sont devenus des outils utilisés dans de nombreux domaines, dont certains sont controversés ou en friche. Lancé en 2003, *QuakeSat* devait aider à mieux prédire les séismes en détectant des changements du champ magnétique terrestre à très basse fréquence (quelques dizaines de hertz). *QuakeSat* a fonctionné quelques mois et renvoyé avec succès des données à sa station au sol basée à Stanford ; la plupart des sismo-

logues restent cependant sceptiques sur la relation entre les très basses fréquences et les tremblements de terre, ou sur l'intérêt de détecter les très basses fréquences depuis l'espace. *LightSail 1*, quant à lui, est un CubeSat 3U conçu par la *Planetary Society* pour tester la première voile solaire au monde – une technologie envisagée pour se propulser dans l'espace et, notamment, sillonner le Système solaire. La NASA a annoncé en février que le CubeSat avait été retenu pour un lancement prochain.

La NASA, les agences de renseignement et les militaires commencent aussi à expérimenter les CubeSats. Ce revirement est remarquable, car il y a encore quelques années, les spécialistes de l'espace pensaient que les CubeSats ne seraient jamais assez puissants ou sophistiqués pour mener des missions scientifiques ou de surveillance, ne seraient jamais commandés avec

précision et rejoindraient les déchets spatiaux qui s'accumulent sur les orbites terrestres basses. La microélectronique, les capteurs, les batteries et autres composants avaient beau s'améliorer, les organismes habitués à financer la construction de satellites de la taille d'une automobile (en centaines de millions d'euros et en milliers d'années de main-d'œuvre) n'imaginaient pas qu'un satellite de la taille d'une boîte à chaussures mérite la moindre attention.

Le programme *Colony 1* du Bureau de reconnaissance américain, par exemple, utilise des CubeSats pour tester en vol de nouvelles technologies avant de les installer sur de gros engins. D'autres scientifiques effectuent dans des CubeSats de la recherche pharmaceutique. Ainsi, le Bureau des petits engins spatiaux, au Centre de recherche Ames de la NASA, a placé en 2006 et 2007 deux CubeSats en orbite terrestre basse pour tester l'utilisation d'outils courants des « laboratoires sur puce », afin d'évaluer si les biologistes pourront réaliser des expériences bon marché en microgravité. Trois ans plus tard, le groupe a testé l'efficacité

de médicaments antibactériens en microgravité – une première étape vers l'élaboration d'une pharmacopée pour missions humaines de longue durée. Et en juillet 2010, l'entreprise *NanoRacks*, à Houston, a installé un support pour CubeSats sur la Station spatiale internationale et loue l'emplacement à des compagnies pharmaceutiques ou à d'autres industries qui souhaitent mener des recherches dans l'espace, ainsi qu'à des établissements d'enseignement, et même à un lycée.

Étudier la thermosphère

Certains CubeSats sont consacrés à la météorologie et au climat. *CloudSat*, conçu par des scientifiques de l'Université d'État du Colorado, étudiera la structure verticale des nuages et leur formation sur des périodes de plusieurs jours, ce que les météorologues embarqués sur des avions ne peuvent pas faire. La mission *Firefly*, soutenue par la *National Science Foundation*, déploiera un détecteur de rayons

gamma et un photomètre pour mesurer les éclairs de rayons gamma terrestres qui jaillissent de l'atmosphère en direction de l'espace, en général lors des orages.

CloudSat et *Firefly* observeront des phénomènes se déroulant dans la troposphère, la couche atmosphérique de 16 kilomètres d'épaisseur dans laquelle nous vivons. Une autre classe de CubeSats étudiera la thermosphère (entre 90-100 kilomètres et 600 kilomètres d'altitude). La thermosphère est balayée par le vent solaire et le plasma ionisé éjecté par la couronne solaire, et est perturbée par l'activité magnétique des taches solaires ; sa limite supérieure s'élève et s'abaisse en fonction de l'activité solaire. Ces variations interfèrent parfois avec les performances des satellites en orbite basse : la Station spatiale américaine *Skylab* s'est désintégrée en 1979 quand un pic d'activité inattendu dans la thermosphère a augmenté la force de traînée exercée sur la station et l'a attirée vers la Terre. La Station spatiale internationale, les satellites du système GPS, de la radio et de la télévision sont en orbite dans la thermos-

LA SCIENCE SPATIALE, NOUVELLE ACTIVITÉ DOMESTIQUE

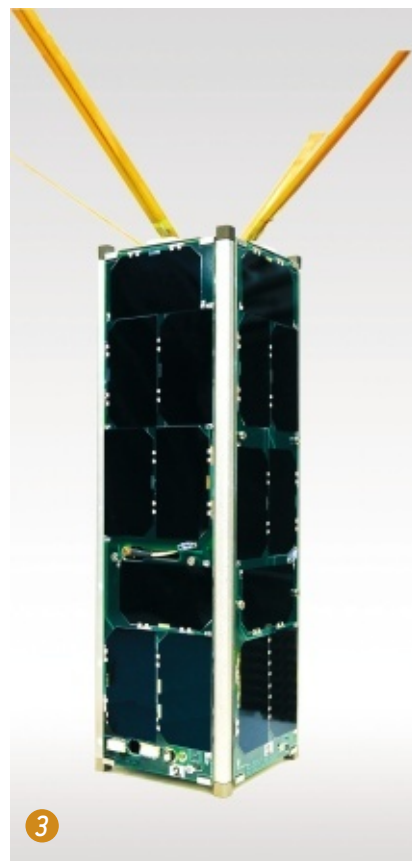
- 1 La Faculté et les étudiants de Cal Poly, l'Université polytechnique d'État de Californie, testent ici un système magnétique pour ajuster l'attitude de vol d'un CubeSat, dans le cadre de la préparation de CP6, une mission CubeSat lancée avec succès en 2009.
- 2 La Suisse a lancé son premier satellite, le *SwissCube*, en 2009. Construit par une équipe qui comptait environ 200 étudiants, ce CubeSat a observé la lueur créée dans la haute atmosphère par les rayons cosmiques.
- 3 Le *Radio Aurora Explorer*, lancé en novembre dernier, étudiera comment le vent solaire perturbe l'ionosphère de la Terre. Il a été construit par l'Université du Michigan et l'Institut de recherche américain *SRI International*.
- 4 Le CubeSat *O/OEOS* (*Organism/Organic Exposure to Orbital Stresses*) de la NASA, lancé en novembre dernier, évaluera la possibilité de faire des expériences biologiques en microgravité à bas coût.
- 5 Des étudiants de l'Université de Liège, en Belgique, construisent le CubeSat *OUTI* (*Orbital Utility for Telecommunications Innovation*) pour les communications radio numériques.



California Polytechnic State University



EPFL



SRI International

phère : comprendre comment se comporte cette couche est donc aussi important pour les communications et la science que l'étude des océans l'est pour le commerce mondial. Or les gros satellites évoluant sur des orbites plus hautes ne peuvent pas observer directement la thermosphère ; ils la voient coincée entre l'exosphère (la dernière couche de l'atmosphère terrestre) et la mésosphère (entre 50 et 100 kilomètres d'altitude environ), tandis que les instruments des fusées sondes prennent des mesures directes, mais seulement le long de la trajectoire de la fusée et durant quelques minutes...

Le premier CubeSat de la thermosphère à atteindre l'espace a été le *SwissCube* de la Suisse, lancé fin 2009. Le *SwissCube* mesure et cartographie la lumière du ciel nocturne, c'est-à-dire la faible émission de lumière issue de réactions chimiques et physiques dans la haute atmosphère, afin d'aider les scientifiques à mieux comprendre ses causes et à la filtrer plus efficacement lorsqu'ils étudient d'autres phénomènes atmosphériques ou terrestres.

L'innovation la plus révolutionnaire apportée par les CubeSats a peut-être été l'introduction d'un nouveau modèle économique dans le domaine spatial. Les CubeSats étant lancés « en seconde classe » dans une fusée affrétée pour une autre mission, les équipes font des économies et partagent les frais. La contrainte principale devient la date de lancement, qui est imposée. En outre, grâce aux faibles coûts, l'échec est mieux toléré tout au long de la conception et du développement : si un CubeSat explose sur l'aire de lancement ou ne se déploie pas dans l'espace, c'est très décevant, mais pas catastrophique (et il y a des ratés : 14 CubeSats ont été perdus à cause d'une panne de fusée en 2006, et 9 autres n'ont pas établi le contact avec la station au sol ou de façon très limitée). Lorsque des satellites classiques sont lancés, plusieurs millions d'euros sont en jeu, contre 70 000 euros pour les CubeSats.

Des satellites jetables

Certaines équipes vont plus loin : elles placent délibérément leurs CubeSats sur des orbites autodestructrices, afin que ceux-ci retombent et se consomment dans l'atmosphère une fois leur mission terminée. « Les CubeSats peuvent aller à des endroits où leur durée de vie sera courte », note J. Puig-Suari. « Je peux faire un satellite jetable que j'enverrai dans des lieux dangereux. Non seulement sa perte n'est pas un problème, mais on peut l'utiliser à notre avantage. »

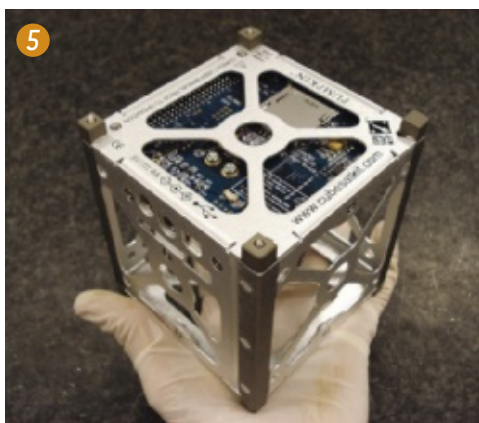
Deux exemples de cette approche sont des missions à la conception desquelles B. Twiggs a contribué. La première est une collaboration d'équipes européennes, asiatiques et américaines appelée QB50. Le consortium va lancer 50 CubeSats 2U à la limite externe de la thermosphère. Sur plusieurs mois, à mesure que les frottements de l'atmosphère ralentiront les satellites, leurs orbites vont se dégrader, et ils vont recueillir des informations sur la composition chimique, la densité et la température de la thermosphère à des altitudes de plus en plus basses, jusqu'à ce qu'ils retombent sur Terre.

Le second exemple est une mission nommée POPACS (*Polar Orbiting Passive Atmospheric Calibration Sphere*). Trois CubeSats 3U seront lancés pour mesurer l'échauffement de l'atmosphère terrestre par les éruptions solaires. Tandis que les

Si un CubeSat explose sur l'aire de lancement ou ne se déploie pas dans l'espace, c'est très décevant, mais pas catastrophique.



NASA/Ames



Université de Liège, Belgique

✓ SUR LE WEB

Le site officiel du projet CubeSat :
www.cubesat.org

Le site d'AMSAT, la corporation des satellites radioamateurs :
www.amsat.org/amsat-new/

Le site du CubeSat Robusta réalisé à l'Université de Montpellier 2 :
www.ies.univ-montp2.fr/robusta/

✓ BIBLIOGRAPHIE

CubeSat Design Specification Revision 12, California Polytechnic State University, 2009.
Disponible sur Internet :
www.cubesat.org/images/developers/cds_rev12.pdf

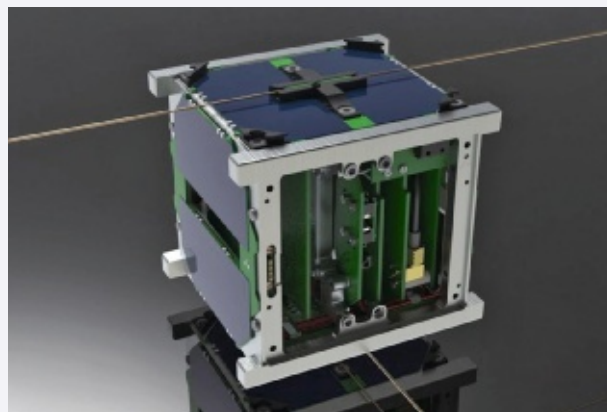
XaTcobeo, Robusta & co : les CubeSats européens

Avant la fin de l'année, le nouveau lanceur européen VEGA mettra sur orbite 9 CubeSats retenus parmi 22 candidats, tous conçus et fabriqués par des universités européennes. Le succès de cet appel à projets de l'Agence spatiale européenne montre que l'Europe n'est pas en reste : le phénomène CubeSat a initié un bouillon de culture technologique et scientifique d'où pourrait bien émerger la technologie spatiale de demain.

Limités en masse et en puissance, les CubeSats sont condamnés à l'innovation. Loin de brider la créativité, le standard CubeSat se trouve décliné en d'innombrables solutions technologiques au service d'une grande variété de missions, de la démonstration technologique aux véritables missions scientifiques. Ainsi, le CubeSat *XaTcobeo*, de l'Université de Vigo, en Espagne, va tester un système de déploiement de panneaux solaires et d'une antenne, ainsi qu'un dispositif de mesure des rayonnements ionisants et un nouveau système radio. Le CubeSat *E-ST@R*, de l'École polytechnique de Turin, en Italie, testera quant à lui un système de contrôle et de détermination de l'attitude du CubeSat. De même, *OUFTI-1*, de l'Université de Liège, en Belgi-

que, et *UWE-3*, de l'Université de Würzburg, en Allemagne, testeront diverses innovations techniques. Les CubeSats italiens *UNICubeSAT*, de l'Université de Rome, et *AtmoCube*, de l'Université de Trieste, vont étudier l'atmosphère terrestre au-dessus de 350 kilomètres d'altitude, tandis que *Goliat*, de l'Université de Bucarest, en Roumanie, prendra des photos de la Terre et détectera les micrométéorites et les rayons cosmiques.

Aujourd'hui, la communauté des CubeSats doit faire face à de nouveaux défis liés à l'accumulation des débris et à la saturation des orbites : la charte des débris spatiaux, dont la France est signataire, impose que tout satellite lancé soit désorbité en moins de 25 ans. Or, si un satellite placé sur une orbite basse redescend en quelques mois, ceux placés sur des orbites supérieures nécessitent une manœuvre de désorbitation que peu de CubeSats sont aujourd'hui capables d'effectuer. Plusieurs projets européens étudient cet aspect : l'Association française des radioamateurs AMSAT-F encadre *Libellule*, un projet étudiant de voile solaire qui se déploiera sur un triple CubeSat pour le freiner et le désorbiter. *PW-Sat*, de l'Université de technologie de Var-



Le CubeSat *Robusta*, de l'Université Montpellier 2.

sovie, en Pologne, testera un système similaire.

En outre, les CubeSats sont souvent construits à partir de composants commerciaux dont la fiabilité n'est pas garantie, vis-à-vis des rayonnements ionisants en particulier. De ce fait, l'espérance de vie d'un CubeSat est de quelques mois pour une occupation d'orbite de plusieurs années. En France, à l'Université Montpellier 2, le groupe RADIAC de l'Institut d'électronique du Sud (IES, UMR 5214, CNRS) étudie les effets des rayonnements ionisants sur les composants électroniques. De ces travaux est né *Robusta*, le premier CubeSat français. Pour répondre à l'appel à idée *Expresso* du

CNES, plusieurs composantes de l'université (la Faculté des sciences, l'IUT de Nîmes, l'école Polytech Montpellier) et trois unités mixtes de recherche Université Montpellier 2-CNRS (IES, LIRMM, LMGC) ont mis leur savoir-faire en commun. Le CubeSat *Robusta*, qui embarquera sur VEGA, validera dans l'environnement radiatif spatial réel une méthode de test des composants mise au point à l'IES. Parrainé par le CNES, *Robusta* est un projet d'enseignement et de recherche auquel plus de 250 étudiants de tous niveaux ont déjà participé.

Laurent Dusseau

Professeur à l'Univ. Montpellier 2
Coordinateur du projet *Robusta*

satellites traverseront l'atmosphère polaire, les scientifiques regarderont comment leurs orbites se dégradent ; ils espèrent ainsi mieux prédire la relation entre la thermosphère et l'activité solaire.

Place aux amateurs !

De façon générale, il est rare qu'un CubeSat soit envoyé seul, car sa petite taille et la faiblesse de son système de communication limitent fortement la quantité de données qu'il pourra recueillir. C'est notamment pour cette raison que la plupart des missions ont été effectuées avec des cubes doubles ou triples, et que les scientifiques expérimentent maintenant le déploiement de réseaux de CubeSats où les satellites se coordonnent et coopèrent, comme des oiseaux qui s'assemblent en vol pour migrer. Les développeurs travaillent sur les communications intersatellites, des systèmes permettant le vol en formation, et même

des câbles de plusieurs kilomètres pour maintenir les satellites groupés.

La DARPA (l'Agence américaine des projets de recherche avancée sur la défense), quant à elle, parraine un projet de recherche de 75 millions de dollars sur les réseaux de CubeSats pour comprendre dans quelles circonstances les CubeSats seraient à même de remplacer les satellites classiques. Des constellations stables de CubeSats pourraient même fournir une alternative aux grands instruments : Gil Moore, professeur émérite à l'Université d'État de l'Utah, nous voit bientôt capables de déployer de grands réseaux éparpillés qui remplaceront les télescopes spatiaux *Hubble* et *Webb*.

Pour étendre encore les capacités des CubeSats, Paulo Lozano, de l'Institut de technologie du Massachusetts, a développé un minuscule système de propulsion électronique qui permettrait aux CubeSats de changer d'orbite. D'autres

travaillent sur l'impression de composants de CubeSats pour réduire les coûts.

À terme, prédit Andrew Kalman, président et architecte technique en chef de la Société *Pumpkin*, les CubeSats seront pour les scientifiques comme des ordinateurs personnels, des fondations sur lesquelles les individus construiront leurs propres applications. Cette idée en suggère une autre encore plus révolutionnaire : si les CubeSats deviennent les ordinateurs personnels de la science spatiale (bon marché, flexibles, banalisés et standardisés), l'espace sera accessible aux amateurs. Cela pourrait arriver très vite : la jeune entreprise spatiale *Interorbital Systems* de Mojave, en Californie, projette d'offrir des kits de CubeSats et des lancements en orbite basse pour moins de 7000 euros. « Les amateurs auront une chance de participer », commente J. Puig-Suari. « Les gens vont commencer à construire leurs propres mini-Hubble. »

À découvrir en kiosque

et sur www.pourlascience.fr



La matière connue n'est qu'une goutte d'eau dans l'Univers. De quoi celui-ci est-il majoritairement constitué ? Que sont ces étranges matière noire et énergie sombre ? Comment imaginer le début et la fin de l'Univers ? Un titre indispensable pour faire le point sur les grandes questions de cosmologie.

→ Feuilletez les premières pages sur pourlascience.fr