

Préface

L'exploration spatiale a toujours été un domaine fascinant, où chaque avancée technologique ouvre de nouvelles perspectives et repousse les limites de notre compréhension de l'Univers. Depuis les premiers satellites envoyés dans l'espace, les progrès réalisés dans ce domaine ont été exponentiels et, aujourd'hui, nous assistons à une révolution silencieuse, mais profonde : l'ère des nanosatellites.

Par leur rapidité et leur souplesse de réalisation, les nanosatellites offrent la possibilité de mettre en œuvre très rapidement de nouvelles technologies pouvant contribuer à l'amélioration des observations de l'environnement terrestre. Cependant, la réalisation de ces nanosatellites ne doit rien sacrifier à la rigueur dans toutes les phases de la mission, depuis la rédaction du cahier des charges scientifique, la conception et la réalisation instrumentale, les procédures d'étalonnage et de test, jusqu'à la phase de validation et d'exploitation de la mission et d'analyse des résultats scientifiques.

À l'heure où le changement climatique provoqué par les activités humaines devient un sujet de préoccupation majeur, nous avons plus que jamais besoin de mesures fiables sur les variables climatiques essentielles permettant de décrire l'évolution du climat et de l'environnement. Ces mesures servent à alimenter les modèles de climat participant aux évaluations du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

Par leurs coûts modestes et leur rapidité de réalisation comparés aux grosses missions des agences spatiales, les nanosatellites offrent la possibilité de multiplier ces mesures et d'améliorer leur couverture géographique et temporelle. Les progrès technologiques rapides permettant la miniaturisation des instruments et l'augmentation

exponentielle des capacités de traitement de données, y compris l'utilisation de logiciels embarqués d'intelligence artificielle, rendent possibles des observations de haute qualité à bord de CubeSats qui n'étaient pas envisageables il y a seulement quelques années.

À travers des exemples de réalisation de CubeSats destinés à l'étude du climat, du bilan radiatif de la Terre, de la variabilité du spectre solaire et de la composition atmosphérique, le lecteur découvrira dans ce volume 2 les défis techniques et scientifiques liés à la conception, au lancement et à l'exploitation des nanosatellites. Seront explorées les innovations technologiques qui rendent possibles ces prouesses, ainsi que les perspectives qu'elles ouvrent.

En conclusion, les nanosatellites représentent une nouvelle ère de l'exploration spatiale, où la collaboration, l'innovation et la démocratisation de l'accès à l'espace sont les maîtres mots. Ce volume est une invitation à découvrir cette révolution en marche et à comprendre comment ces petits engins spatiaux peuvent transformer notre avenir.

Alain HAUCHECORNE

Directeur de recherche émérite au CNRS
et membre de l'Académie de l'air et de l'espace

Introduction

La série d'ouvrages sur les nanosatellites vise à fournir en trois volumes les connaissances nécessaires à la fabrication et à l'utilisation de nanosatellites pour l'observation de l'atmosphère terrestre et l'étude du réchauffement climatique, en adoptant une approche d'ingénierie des systèmes. Les études sont réalisées à partir d'outils spectroscopiques et d'analyses de données pour appréhender le réchauffement climatique. Le volume adopte une approche systémique, en mettant l'accent sur les CubeSats et en renvoyant en annexe l'essentiel des théories utilisées pour la conception des nanosatellites.

Dans l'introduction du volume 1, l'avènement de l'ère NewSpace dans le domaine spatial a été mis en avant comme l'un des axes marquants de l'évolution du XXI^e siècle, caractérisé par de profondes mutations sociétales et technologiques. Le NewSpace fait référence à nos avancées technologiques et sociétales dans le domaine de l'exploration spatiale. Cette ère est caractérisée par des innovations telles que les lanceurs réutilisables et les nanosatellites, facilitant l'observation de la Terre et l'exploration spatiale par la réduction des coûts. Elle s'inscrit dans la dynamique de la révolution postindustrielle 4.0, qui intègre les technologies numériques dans divers domaines économiques, influençant fortement le développement spatial. Les avancées en intelligence artificielle, en biotechnologie et en informatique génétique, notamment en paléogénomique, témoignent de cette transition.

En résumé, le volume 1 permettait de retracer l'histoire de l'ère du spatial depuis les premiers satellites jusqu'à l'ère du NewSpace, en soulignant les innovations technologiques et les retombées sociétales des activités spatiales, comme la météorologie, les télécommunications et les systèmes de positionnement global, dans son chapitre 1. Les chapitres 2 et 3 se consacraient aux paramètres orbitaux des CubeSats, retraçant l'évolution des théories astronomiques et les différentes approches pour calculer les trajectoires orbitales suivies, ainsi qu'aux lanceurs spatiaux, tant publics que privés,

dans le contexte d'un nouveau modèle économique permettant des lancements combinés de grands et petits satellites, ce qui permet de réduire les coûts. Enfin, les petits satellites, notamment les CubeSats, faisaient l'objet du chapitre 4, qui portait sur leur fabrication, leur structure, leurs fonctions et optimisations mécaniques par le biais de la simulation – UVSQ-SAT et INSPIRE-SAT 7 étaient pris comme exemples concrets de CubeSats déjà lancés et en opération. Chaque chapitre comprenait des annexes sur les notions de mathématiques, physique et mécanique, et une bibliographie pour des approfondissements pouvant intéresser le lecteur selon son domaine d'étude.

Le contenu de l'ouvrage s'inspire des cours et des séminaires de M. Meftah, P.R. Dahoo et A. El Hami, dans le cadre de leurs activités d'enseignement et de recherche, et s'appuie sur le retour d'expériences acquises dans les activités de recherche au niveau national au Laboratoire atmosphères et observations spatiales (LATMOS) et à l'INSA de Rouen, des travaux de recherche dans le domaine de l'instrumentation et de la spectroscopie pour l'astronomie et l'astrophysique ou de l'optimisation en mécanique. Les équipes de recherche sont impliquées dans l'observation du spatial, d'une part par la mise en œuvre d'instruments d'observation, d'autre part par les analyses des données d'observation en partenariat avec d'autres instituts ou organismes nationaux ou internationaux ou de partenaires industriels.

Les retours d'expériences, aussi bien dans le domaine de la fabrication de CubeSats que de l'observation à partir des instruments embarqués à bord d'UVSQ-SAT et INSPIRE-SAT 7 (INSPIRE – *International Satellite Program in Research and Education*), lancés respectivement en 2021 et 2023, sont mis à la portée des chercheurs, ingénieurs, enseignants et élèves d'écoles d'ingénieurs ou de masters ou de bachelors, et chefs d'entreprise, leur offrant les connaissances requises pour s'engager dans les activités socio-économiques du NewSpace.

Le contenu de la série sur les nanosatellites pour observer et étudier le spatial est à la portée de tout groupe, attiré par leur faible coût et leurs courts délais de mise en œuvre, souhaitant s'y engager pour collecter des données utiles à l'étude du réchauffement climatique, pour suivre l'évolution de l'atmosphère terrestre en recherche, ou pour investir dans le domaine de la météorologie, de la communication ou de la collecte de données (*Big Data*) à travers un réseau de satellites en industrie.

Cinq chapitres sont développés dans le volume 2, les trois premiers mettant l'accent sur les instruments embarqués en fonction de la mission du CubeSat, depuis la phase de conception jusqu'à la phase d'opération en vol après lancement et l'optimisation des architectures optique, électrique et thermique une fois la structure métallique validée. Les tests environnementaux font l'objet de discussions dans le cadre des simulations et expérimentations à mener pour précipiter les défauts, s'assurer de

sa fiabilité, mettre le CubeSat en conformité avec la législation pour son mode opératoire, et répondre au cahier des charges du lanceur choisi pour son envoi dans l'espace sur la trajectoire de son orbite. Dans le quatrième chapitre, un exemple de mise en œuvre d'une charge utile à l'observation du Soleil et de ses effets est présenté dans le cadre du troisième CubeSat UVSQ-SAT NG, dont le lancement est prévu en mars 2025 en Californie. Enfin, dans le cinquième et dernier chapitre, l'évolution de nos connaissances et de nos méthodes sur le phénomène lumineux et la lumière est retracée depuis l'Antiquité jusqu'à la fin du Moyen Âge. Les avancées actuelles – avec une méthodologie basée non seulement sur la réflexion, mais aussi sur l'expérimentation après la révolution scientifique il y a cinq cents ans – sont également présentées. Chaque chapitre comprend une annexe dans laquelle sont donnés les théories, les modèles développés ou les simulations conduites dans le cadre du contenu du chapitre. Ces modèles et théories utilisés peuvent servir de passerelles pour des approfondissements sur des domaines précis pouvant intéresser le lecteur.

Le chapitre 1 est consacré à l'architecture optique adaptée aux instruments utilisant les ondes électromagnétiques pour sonder le milieu à étudier. Il présente les différents outils pouvant être développés, à savoir les imageurs à haute résolution spatiale avec des caméras, les radiomètres pour les mesures de champs de températures, les spectro-imageurs de résolutions spatiale et spectrale pas très élevées utilisés pour les missions de télédétection, de reconnaissance et de surveillance des sols, des spectromètres pour mesurer des températures, des pressions ou des contenus en vapeur d'eau, les LiDAR, sondeurs verticaux actifs de l'atmosphère, pour mesurer les concentrations des constituants de la basse atmosphère (CO_2 , CH_4 , etc.) et les télescopes pour faire de l'imagerie à très haute résolution. Les effets de distorsion instrumentale lors des mesures des phénomènes observés sont décrits, ainsi que les démarches à suivre pour réduire ces distorsions. Le système de détection par CCD est aussi présenté, avec un accent sur leurs avantages et inconvénients, ainsi que la manière dont les données sont collectées et transmises au système électronique chargé de les transmettre par la suite au segment sol.

Le chapitre 2 s'intéresse à l'architecture thermique et électrique, et aux sources de chaleur en mode fonctionnement du CubeSat. Les différents éléments présents dans les sous-systèmes électriques et thermiques sont présentés avec un accent sur les différentes technologies accessibles pour refroidir ou éventuellement chauffer, en mode passif ou dynamique. L'objectif de maîtriser les effets thermiques est explicité, de même que les moyens employés pour ce faire. Il s'agit du maintien en temps réel du CubeSat dans une plage de température qui permette aux différents capteurs et instruments de bord à base de composants électroniques de fonctionner correctement en vol sur son orbite. Le couplage électrothermique est présenté, ainsi qu'un calcul analytique basé sur les équations de la chaleur et les différentes voies par lesquelles

cette dernière peut se propager, soit la conduction, la convection naturelle ou forcée et le rayonnement. La fabrication de ces nanosatellites avec un niveau de maturité technologique (TRL) [ECS 17b] passant des niveaux stables à 9, en particulier dans les champs technologiques liés aux mécanismes et aux systèmes de gestion du contrôle thermique dans le domaine spatial, est expliquée avec les exemples de UVSQ SAT et INSPIRE SAT-7, utilisés pour montrer comment cette phase de contrôle de la plage de température de fonctionnement du CubeSat peut être effectuée avec les retours d'expérience des missions effectuées ou en cours. Un troisième nanosatellite, UVSQ-SAT NG, dont le lancement est prévu en mars 2025, sera certainement fonctionnel à une altitude moyenne de 500 km lorsque ce volume sera édité.

Le chapitre 3 présente les tests environnementaux nécessaires pour s'assurer d'une conception robuste et fiable, et pour répondre, d'un point de vue des normes juridiques, aux cahiers des charges de la société exploitant leur lanceur et de la législation à respecter en fonction de la mission du CubeSat. L'environnement dans lequel le nanosatellite est amené à opérer, ainsi que les contraintes subies par le CubeSat, que ce soit d'un point de vue thermique, magnétique, électrique, ou les agressions par les particules chargées ou autres radiations, sont décrits. Les dispositifs technologiques embarqués doivent également être optimisés pour les fonctions qu'ils assurent et dans leurs couplages avec l'architecture mécanique support. Les différents couplages, qu'ils soient internes du fait de la charge utile ou externes du fait de l'environnement dans lequel le nanosatellite va évoluer, doivent être étudiés par simulation, par la méthode des éléments finis présentée dans le volume 1, afin d'anticiper les tests environnementaux et éventuellement de corriger les défauts de conception. Ces essais de type HALT ou HASS s'appuient également sur le retour d'expérience des missions précédentes, et concernent les phénomènes thermiques, vibratoires, électromécaniques, thermomécaniques, électrothermomécaniques ou la compatibilité électromagnétique à contrôler pour s'assurer de sa fiabilité opérationnelle. Les procédures FIDES ou RBDO peuvent également être employées pour optimiser la fiabilité du CubeSat.

Le chapitre 4 est consacré à la mise en œuvre d'un système optique d'observation et d'étude dans le cadre d'un spectromètre fonctionnant dans l'infrarouge proche (NIR). L'étalonnage des instruments scientifiques et des vérifications sont nécessaires pour valider son opérabilité en phase de mission. Le chapitre donne un exemple de calibrage d'une charge utile à l'observation du Soleil et des études préliminaires menées au sol dans le cadre du troisième CubeSat UVSQ-SAT NG. Ces mesures seront ultérieurement confrontées à celles effectuées lors de la mission en vol du CubeSat. Les différents types d'analyses sont présentés pour ajuster les données sur des modèles validés dans des missions antérieures, comme fournir un spectre solaire extraterrestre en utilisant la technique du tracé de Langley (*Langley plot*). Les mesures sont interrogées au regard des applications relatives à la recherche, comme l'étude

du climat, de l'environnement et la surveillance du bilan radiatif. Les mesures au sol sur le site de Pommier en mai 2024 ont permis de vérifier l'étalonnage absolu du spectromètre UNIS NIR dans des conditions réelles et de déterminer le spectre solaire à TOA sur la base de la technique *Langley plot*. Le spectre solaire obtenu avec le spectromètre d'UVSQ-SAT NG est cohérent avec les spectres solaires SOLAR-HRS et TSIS 1-HSRS issus de mesures antérieures, validant ainsi la précision de nos mesures. Les courbes présentées en fonction des différents scénarios de mesures donnent la mesure des stratégies à adopter pour qualifier l'instrument de mesure au sol.

Le chapitre 5 est consacré à l'évolution des connaissances et des méthodes scientifiques dans le domaine de l'optique et de l'étude des phénomènes lumineux, depuis qu'une trace dans l'histoire de l'humanité a pu être découverte, soit de l'Antiquité jusqu'au Moyen Âge. Elle montre à quel point cette avancée des sciences est jalonnée de pièges et de chausse-trappes dans lesquels même les meilleurs tombent parfois. Soulignons que le contenu de ce chapitre est dépendant de la bibliographie consultée et est susceptible d'être amélioré, comme il est d'usage en sciences, mais contient les événements les plus importants dans l'histoire des sciences au Moyen-Orient et en Europe. Les découvertes se faisaient de manière empirique, soit par des propositions théoriques et parfois par des expériences conduites avec les moyens de l'époque. Si Euclide avait dans son traité posé les bases de l'optique géométrique, il restait des zones d'ombre comme l'origine de la source du rayon lumineux. Deux hypothèses avaient cours : le rayon venait de l'œil ou le rayon était issu de l'objet, avec parfois l'emploi des deux hypothèses selon les circonstances. La révolution scientifique qui suivra la fin du Moyen Âge avec les travaux de Nicolas Copernic, Tycho Brahe, Galileo Galilei, René Descartes, Isaac Newton, Bacon, et bien d'autres, va donner une méthode scientifique basée sur l'expérience pour valider les hypothèses théoriques. Cette avancée a bénéficié des travaux des anciens précurseurs, mais n'a pas empêché pour autant les controverses à l'intérieur même du cercle des scientifiques, parfois malgré la démonstration expérimentale invalidant certaines hypothèses des théories acceptées. Nous accordons une attention particulière à la dualité onde/corpuscule, l'intrication quantique et la téléportation, ainsi qu'au vide quantique, en fin de chapitre.