

Préface

L'exploration spatiale fait appel à des réalisations technologiques particulières du fait, d'une part, des conditions extrêmes dans lesquelles les équipements à bord de satellites ou sondes spatiales (vide, température, vibrations, rayonnement, etc.), et, d'autre part, du fait que les objets spatiaux doivent évoluer de manière autonome sans intervention directe des opérateurs.

Les ressources et les expertises nécessaires pour faire fonctionner des appareils dans ces conditions sont considérables, et ont limité le nombre de pays capables d'investir dans ce domaine *via* des structures spécifiques, comme des agences spatiales.

Si le spatial reste un domaine d'attention et de fascination pour beaucoup, nous occultons souvent les applications révolutionnaires uniquement permises depuis l'espace et qui concernent notre vie quotidienne : nombreuses applications en lien avec la vision globale de la surface de la Terre, de son environnement et des processus météorologiques, la communication et la diffusion de contenus, le positionnement, la traçabilité et le pilotage depuis l'espace, la sécurité et la surveillance, la réalisation de certains processus biologiques et l'impact sur les effets médicaux, l'amélioration de nos connaissances de l'Univers et de l'évolution des autres planètes, etc. Ces applications grandissantes en font aujourd'hui un secteur économique majeur, générant des enjeux géopolitiques et de sécurité.

Paradoxalement, la miniaturisation technologique et la privatisation du secteur ont ouvert ce secteur industriel, qui connaît aujourd'hui une forte fragmentation, tout comme les autres secteurs étatiques qui ont connu cette évolution à la suite d'une forte ouverture et implication de la sphère privée. De nombreux nouveaux acteurs et initiatives ambitieuses voient le jour. La forte compétition entre les parties prenantes impose d'être innovant et de modifier les pratiques de pilotage des développements, leur financement et leur commercialisation.

Cependant, le NewSpace ne peut se soustraire de l'expérience accumulée au fil des années. Les fondamentaux n'ont pas changé et l'environnement spatial nécessite de développer des appareils toujours plus élaborés – automatisés, mais toujours aussi robustes, garantissant un fonctionnement optimal dans ce milieu hostile.

Seule la méthode agile permet de bien instruire les nouveaux challenges proposés et de bien identifier les points critiques sans se perdre dans des approches systématiques et coûteuses. Dans cette logique, outre une bonne connaissance de l'ensemble des étapes de développement et de validation de la technologie utilisée, il est très instructif d'analyser les réussites et échecs du passé. Cela est vrai pour les développements historiques, même les plus lointains, jusqu'aux étapes successives du développement d'un composant. C'est cette analyse de l'échec qui permet de rapidement se concentrer sur les points les plus critiques, les hiérarchiser, et ainsi fiabiliser les solutions techniques envisagées dans un temps beaucoup plus court.

Cette série d'ouvrages permet de fournir aux lecteurs les bases, en analysant cette histoire spatiale et les différentes étapes d'un développement instrumental. Basée sur le retour d'expérience, autour des développements et analyses réalisés dans le cadre de la recherche, cette lecture permettra à ceux qui le souhaitent de parfaire leur connaissance, leur vision de ce secteur en pleine mutation, et de mieux comprendre son évolution : des fondamentaux et de la rupture.

Philippe KECKHUT,
ancien directeur du laboratoire LATMOS,
ancien vice-président Recherche
de l'Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines,
en charge de l'académie spatiale d'Île-de-France

Introduction

Le XXI^e siècle se présente dans l'histoire des sociétés humaines comme celui de toutes les transitions. Nous observons une période de l'histoire de l'humanité qui autorise toutes les ruptures en matière de modes de vie par l'accroissement des entropies associées aux divers degrés de liberté d'action et d'activité possibles. Un des champs d'activité concerne l'ère du spatial et l'ère NewSpace. Le nom aurait pu être différent, parce que le terme *New* fait référence à quelque chose de nouveau alors que l'Univers a toujours été là, et que ce sont nos prouesses technologiques qui nous permettent d'atteindre ce qui a attisé la curiosité des premiers astronomes.

La révolution industrielle 4.0 du XXI^e siècle préfigurait l'accroissement attendu des processus utilisés dans les activités économiques, qui reposent sur les technologies du numérique à travers des algorithmes prédéfinis par des objectifs tels que l'intégration système, la réalité augmentée, la réalité virtuelle, le jumeau numérique, l'intelligence artificielle, la logistique à court ou à long terme, l'analyse de données dans le cadre du traitement des grandes bases de données, la cybersécurité, le robot autonome, la fabrication additive, l'Internet des objets, le *cloud computing*, le bitcoin et la simulation des processus complexes chimiques et biologiques des biotechnologies (infotech, biotech, etc.).

Le développement de logiciels induit les processus de la transition digitale et a un impact sur l'aide à la réflexion avec les percées et la démocratisation de l'IA. Notons que l'apport des outils informatiques et le développement des technologies dans le domaine de la génétique et du séquençage du génome humain depuis les années 2000 ont permis l'émergence d'une nouvelle discipline : la paléogénomique, initiée par le récent prix Nobel de médecine et physiologie Svante Pääbo, en 2022, dans le cadre de l'étude de l'ADN ancien par la paléogénétique.

Parallèlement à cette réalité qui tend vers la révolution 4.0+, nous observons à travers le NewSpace une volonté d'augmenter nos degrés de liberté, nous amenant vers une nouvelle voie autorisant peut-être la privatisation de l'espace et la concrétisation du rêve de la conquête de l'espace et de l'Univers.

Si les deux premiers satellites Spoutnik 1 et Spoutnik 2 furent lancés par l'URSS en 1957, le 4 octobre et le 3 novembre, le lancement d'Explorer 1 et de Vanguard 1 par les Américains eut lieu peu après, en 1958, le 1^{er} février et le 17 mars. La première découverte majeure fut les ceintures de Van Allen par les Américains qui, grâce à un enregistreur magnétique embarqué sur Explorer 3, purent interpréter correctement les signaux transmis par les premiers satellites, mais qui étaient restés une énigme jusqu'alors. Ces ceintures portent le nom de Van Allen qui, avec son équipe, mit au point de nombreux instruments d'observation embarqués en tant que charge utile sur les satellites américains.

Les avancées technologiques et les stratégies pour l'exploration et l'observation dans le domaine du spatial vont ainsi suivre une trajectoire qui, dans sa phase initiale, dans les années 1960, démarre avec une typologie de satellites soit de forme sphérique, soit de forme cylindrique avec des masses ne dépassant pas la centaine de kilos, munis des technologies dernier cri, pour évoluer depuis le milieu des années 1970 à nos jours vers des objets technologiques plus élaborés, dépassant quelques milliers de kilos et pouvant atteindre des dizaines de tonnes.

L'histoire de l'exploration spatiale peut être divisée en plusieurs périodes distinctes. Dès 1957, les bases de cette aventure sont établies avec l'acquisition des connaissances et des technologies nécessaires pour envoyer l'homme dans l'espace. Cette période s'étendant de 1957 à la clôture du programme Apollo en 1972 est caractérisée par d'importants bouleversements, et est souvent considérée comme l'âge d'or de l'exploration spatiale. Au cours de cette période, les deux superpuissances mondiales de l'époque, les États-Unis et l'Union soviétique, s'engagent indirectement dans une compétition spatiale.

La période suivante, qui s'étend de 1972 jusqu'à la fin de la guerre froide, au début des années 1990, a été marquée par des enjeux géopolitiques dans un espace de plus en plus militarisé, où les satellites étaient principalement développés à des fins militaires telles que l'observation, l'écoute, la communication et la navigation. Parallèlement, la recherche spatiale a connu un essor significatif, conduisant à des avancées majeures dans la recherche scientifique et à une coopération internationale accrue.

À partir de la fin de la guerre froide en 1991, l'exploration spatiale a évolué dans un contexte de domination unipolaire, avec les États-Unis en position prédominante. À la fin des années 1990, l'ère du NewSpace a émergé, marquée par une initiative privée

croissante dans l'industrie spatiale. Des personnalités entrepreneuriales telles qu'Elon Musk (SpaceX), Jeff Bezos (Blue Origin) et Richard Branson (Virgin Galactic) ont joué un rôle essentiel dans cette nouvelle ère, avec des objectifs ambitieux comme l'exploration de Mars, de la Lune et les vols suborbitaux. Le NewSpace apporte une dynamique nouvelle à l'industrie spatiale grâce à des lanceurs réutilisables et à la miniaturisation des satellites.

En parallèle, un nouveau format de satellite, défini en 1999 par l'Université d'État polytechnique de Californie et l'Université de Stanford (États-Unis), est inventé. Il offre de nouvelles perspectives d'observation de la Terre. En effet, c'est en 1999, dans un projet éducatif permettant d'imaginer, de concevoir, de mettre en œuvre, de tester et d'exploiter dans l'espace un engin spatial complet réalisé dans un délai raisonnable, lors d'un cursus de trois à cinq ans pour former des universitaires, que les CubeSats, des cubes de 10 x 10 x 11,35 cm (1U), virent le jour en Californie. Ils ouvrirent une nouvelle ère de la conquête de l'espace.

Ainsi, on peut affirmer que si l'immensité du cosmos paraissait essentiellement froide et stérile jusqu'au milieu du XX^e siècle, le lancement de Spoutnik 1 a marqué le début de l'ère spatiale. L'envoi d'explorateurs scientifiques robotisés à travers le Système solaire, les observatoires spatiaux en orbite terrestre, le développement de techniques de détection avancées et de télescopes de plus en plus puissants ont permis d'acquérir de nouvelles connaissances à travers l'observation du spatial. Tout cela a totalement révolutionné notre vision à la fois des atmosphères planétaires et du milieu interstellaire, dévoilant une richesse moléculaire insoupçonnée amenant la création, à côté de l'astrophysique, de nouvelles disciplines comme l'astrochimie. Les modèles de la physique et de la chimie moléculaire permettant d'étudier les espèces chimiques par la théorie de la mécanique quantique ont, dans le sillage de ces développements, fourni une analyse fiable, précise et de qualité par la spectroscopie. Cet outil permet d'obtenir les informations nécessaires quant aux paramètres pression, température, humidité, vitesse des vents ou flux solaire, à la compréhension des processus qui pilotent la dynamique des atmosphères des planètes, en particulier celle de la Terre.

Avec les observatoires dans le domaine micro-ondes implantés au sol, dans des régions très sèches de haute altitude (ALMA) ou de manière aéroportée (ballons stratosphériques, SOFIA), les astrophysiciens disposent d'une importante batterie d'instruments dédiés à la spectroscopie, incluant les spectromètres embarqués sur les sondes spatiales à destination de Vénus (Venus Express), Mars (Mars Express, TGO, etc.), Jupiter (Juno), Saturne (Cassini-Huygens), des comètes (Rosetta), ou l'observatoire terrestre JWST (James Webb).

L'avenir s'annonce enthousiasmant dans ce domaine, avec les futurs observatoires terrestres (E-ELT, etc.), spatiaux (WFIRST) et différentes missions planétaires. La

constellation de nanosatellites permettra quant à elle d'affiner la précision sur les mesures spatiales et temporelles.

Ce volume est le premier d'une série de trois ouvrages et discute de l'ère du spatial depuis son origine au milieu du XX^e siècle, et jusqu'à l'ère NewSpace du XXI^e siècle. Son contenu est issu 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 des retours d'expériences menées dans les activités de recherche du Laboratoire atmosphères et observations spatiales (LATMOS) et à l'INSA de Rouen, consécutifs aux 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, et d'autre part par les analyses des données d'observation en partenariat avec d'autres instituts ou organismes nationaux (CNES, ONERA, etc.), internationaux (ESA, Institut royal d'aéronomie spatiale de Belgique (IASB), Institut Lafayette, Jet Propulsion Laboratory, etc.) ou de partenaires industriels (AMSAT-F, F6KRK, Electrolab, ACRI-ST, Adrelys, Hensoldt Space Consulting, Oledcomm, Nanovation, etc.), pour n'en citer que quelques-uns.

Le présent ouvrage est ainsi destiné à faire le point sur les connaissances nécessaires à la fabrication et à l'utilisation de nanosatellites dans le cadre de l'observation de l'atmosphère d'une planète, en particulier la Terre, et de fournir à partir des outils spectroscopiques nécessaires à leur étude les données nécessaires pour appréhender le réchauffement climatique. Il est présenté sous l'approche ingénierie des systèmes ou l'approche systémique. Chaque chapitre comprend une annexe présentant les connaissances nécessaires en mathématiques, physique ou mécanique pour que le lecteur qui souhaite approfondir les notions développées dans le corps du chapitre puisse y accéder. La bibliographie, bien que non exhaustive, est conséquente pour permettre ces approfondissements.

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

Quatre chapitres sont ainsi développés dans le premier volume pour tracer l'évolution de l'ère du spatial et le contexte d'une mission d'observation spatiale en utilisant les CubeSats comme exemples. Ces derniers sont en effet à la portée de tout

groupe souhaitant s'y engager, grâce à leur coût et aux délais de mise en œuvre, pour collecter les données utiles à l'étude du réchauffement climatique, pour suivre l'évolution de l'atmosphère terrestre en recherche ou 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. Dans le quatrième et dernier 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 2025.

Le chapitre 1 retrace l'histoire du spatial depuis la mise en orbite des premiers Spoutnik, lancés en 1957 par la Russie et suivis de près par les satellites Explorer 1 et Vanguard 1, lancés en 1958 par les États-Unis d'Amérique, et jusqu'au NewSpace du XXI^e siècle. Ainsi, après la phase initiale de développement exacerbée par la rivalité entre les deux pays dans le contexte de la guerre froide, et conduisant aux premiers événements marquants tels que celui du premier homme et de la première femme en vol dans l'espace et du premier homme sur la Lune, viendront les premières applications des activités du spatial de nature scientifique, d'une part par la découverte des ceintures de Van Allen, et d'autre part par les applications commerciales pour la météorologie. L'accent est notamment mis dans ce chapitre sur les diverses innovations méthodologiques et technologiques dans le cadre de l'ingénierie des systèmes complexes. Sont aussi abordées les retombées sociétales des technologies impliquant le spatial en matière de recherche sur l'observation de l'atmosphère terrestre, dans le cadre du réchauffement climatique ou l'exploration du Système solaire, et l'observation de l'Univers au moyen des télescopes en orbite. Une mention des activités socio-économiques liées au spatial est faite concernant les données, que ce soit pour la météo, les télécommunications (téléphone, radio, télévision, Internet), le GPS (*Global Positioning System*) ou l'Internet des objets, ainsi que les avancées technologiques concernant les lanceurs réutilisables, les projets spatiaux Terre-Lune, Terre-Mars, les nanosatellites ou les jumeaux numériques.

Le chapitre 2 discute des paramètres orbitaux du CubeSat dans son mouvement en tant que satellite artificiel autour de la Terre. Après un rappel sur la géométrie des courbes associées aux coniques et leurs expressions analytiques dans un repère cartésien, l'histoire des hypothèses théoriques consécutives aux observations du ciel par les anciens astronomes est présentée. Le débat entre le modèle géocentrique et héliocentrique du Système solaire pour interpréter le mouvement des planètes, avec une mention de Copernic, de Kepler, de Galilée, de Newton et d'Einstein en tant que principaux contributeurs de l'héliocentrisme et des théories de la gravitation, est abordé. De même, les différentes approches (Newton, Lagrange, Hamilton) pour traiter de la mécanique des systèmes sont présentées pour le calcul de la trajectoire de systèmes soumis à la force de gravitation, notamment l'orbite circulaire ou elliptique

d'un satellite naturel ou artificiel autour d'un centre attracteur à des altitudes différentes. Six paramètres de Kepler sont utilisés pour décrire l'orbite d'un CubeSat autour de la Terre, avec comme référence le plan équatorial par rapport auquel sont définis le périégée (périapse ou périastre, au plus près d'un astre) et l'apogée (apoapse ou apoastre, au plus éloigné d'un astre), qui permettent pour une orbite elliptique de trouver un compromis entre deux possibilités, une grande couverture et une faible résolution à l'apogée, et inversement une faible couverture et une grande résolution au périégée.

Le chapitre 3 présente les lanceurs spatiaux des satellites de différents pays ou consortiums en montrant l'évolution du public, avec les lanceurs des institutions étatiques comme ceux de la NASA au cap Canaveral, de l'ESA en Guyane ou de l'agence spatiale Russe à Baïkonour, et du privé, avec le développement de l'industrie du spatial et du nombre de sites et de lanceurs (SpaceX, etc.). Le nouveau modèle économique qui permet un lancement à la fois de gros satellites et de centaines de petits satellites (CubeSats, nanosatellites, etc.) est discuté, car il permet de réduire les coûts d'un lancement et de mises en orbite. Les normes à respecter et les contraintes auxquelles sont soumises la procédure de lancement et la mise en orbite sont également présentées.

Le chapitre 4 est consacré aux satellites de petite taille, de masses situées dans un domaine de 500 kg à 4 tonnes, notamment à la fabrication de CubeSats, selon la méthodologie des précurseurs universitaires Jordi Puig-Suari de l'Université d'État polytechnique de Californie et Bob Twiggs de l'Université de Stanford. Le modèle de CubeSat le plus petit, qualifié de 1U, est un cube de dimensions 10 x 10 x 11,35 cm, qui pourra atteindre 12U en volume en fonction de la charge utile qu'il va transporter pour sa mission de collecte de données. La structure d'un CubeSat, en particulier l'architecture mécanique compte tenu de sa charge utile, avec référence à l'UVSQ-SAT et à l'UVSQ INSPIRE-SAT 7, ainsi que ses principales fonctions, sont décrites, notamment celles concernant les liaisons entre le satellite et les stations de collecte. Les optimisations du point de vue mécanique, par le biais de simulations conduites par la méthode des éléments finis pour garantir la robustesse par rapport aux contraintes environnementales lors du lancement et dans son mouvement orbital, sont également abordées.