



HAL
open science

**Observation de la Terre et du Soleil depuis l'espace :
vers un changement de paradigme Earth and Sun space
observations: Towards a new paradigm**

Philippe Keckhut, Mustapha Meftah, Laurence Croizé

► **To cite this version:**

Philippe Keckhut, Mustapha Meftah, Laurence Croizé. Observation de la Terre et du Soleil depuis l'espace : vers un changement de paradigme Earth and Sun space observations: Towards a new paradigm. *L'Espace Politique*, 2024, 51-52. insu-04713603

HAL Id: insu-04713603

<https://insu.hal.science/insu-04713603v1>

Submitted on 29 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

L'Espace Politique

Revue en ligne de géographie politique et de géopolitique

51-52 | 2023-3/2024-1

Géopolitique de l'espace extra-atmosphérique + Varia

Géopolitique de l'espace extra-atmosphérique

Géopolitiques de l'espace

Observation de la Terre et du Soleil depuis l'espace : vers un changement de paradigme

Earth and Sun space observations: Towards a new paradigm

PHILIPPE KECKHUT, MUSTAPHA MEFTAH ET LAURENCE CROIZÉ

Résumés

Français English

Les plateformes satellites positionnées autour de la Terre ont permis d'obtenir une vision globale de notre planète. Toutefois, quelles que soient leurs performances, les satellites « traditionnels » sont insuffisants pour fournir les informations nécessaires à la compréhension des mécanismes mis en jeu afin de suivre les aléas climatiques, d'améliorer la prévision météorologique et la sécurité civile et militaire. Depuis quelque deux décennies, permettant de répondre à ces nouvelles questions scientifiques et sociales, de nouveaux vecteurs techniques apparaissent, notamment les constellations de petits satellites et les plateformes stationnaires comme les drones, planeurs et ballons. Cette évolution, correspondant à une approche à la fois complémentaire et en rupture avec l'approche précédente, favorise, en combinaison avec les outils de l'intelligence artificielle en plein développement, des observations plus nombreuses et de plus grande qualité.

Satellite platforms positioned around the Earth have made it possible to obtain a global vision of our planet. However, whatever their performance, "traditional" satellites are insufficient to provide the information necessary to understand the mechanisms involved in monitoring climatic hazards, improving weather forecasting and civil and military security. For some two decades, making it possible to answer these new scientific and social questions, new technical vectors have appeared, notably constellations of small satellites and stationary platforms such as drones, gliders and balloons. This development, corresponding to an approach that is both complementary and breaks with the previous approach, promotes, in combination with the tools of artificial intelligence in full development, more numerous and higher quality observations.

Entrées d'index

Mots-clés : espace, cubesat, constellation, observation de la Terre

Keywords: space, cubesat, constellation, Earth observation

Texte intégral

Introduction



1 Longtemps, en permettant une couverture globale, l'espace a ouvert des opportunités

déterminantes pour l'observation de la Terre. Aujourd'hui, les enjeux soulevés par la question du changement climatique renforcent le besoin d'une observation toujours plus précise, afin de comprendre les processus physico-chimiques mis en jeu et leurs possibles évolutions sous l'effet des activités anthropiques. Ouvrant de nouvelles opportunités pour étudier et surveiller notre planète, de nouveaux types de plateformes émergent depuis la fin des années 1990, à l'instar des *cubesats* ou des dirigeables stationnaires (en anglais HAPS : High-Altitude Platform Station). Parallèlement, le secteur spatial est en pleine mutation, ce qui se traduit par une implication grandissante des acteurs industriels et commerciaux, en complément des principales agences gouvernementales traditionnelles (Figure 1), mais également par des pratiques différentes. Cette évolution n'est pas sans conséquence sur la recherche scientifique faisant émerger de nouvelles opportunités.

- 2 Si le développement du secteur spatial a toujours oscillé entre compétition et collaboration, il est aujourd'hui au centre des préoccupations géopolitiques, qu'elles soient d'origine commerciales ou militaires. C'est dans cette perspective qu'avait été créé le *Committee on Space Research* (COSPAR), en 1958, afin de maintenir une collaboration pacifique entre les États ; le COSPAR poursuit toujours aujourd'hui cette mission (Coustenis, et al., 2019). Par ailleurs, le changement climatique conduit les pouvoirs politiques à prendre des mesures destinées à répondre aux enjeux environnementaux, en particulier par la définition d'un cadre légal approprié mais également un besoin grandissant d'observations pour comprendre et réguler les activités polluantes.
- 3 Dans ce contexte, comment la recherche scientifique peut-elle profiter de ces diverses évolutions pour améliorer l'observation de la Terre et mieux documenter les défis liés aux changements de notre environnement, lesquels nécessitent toujours plus d'observations et, corrélativement, le développement de nouveaux outils techniques et scientifiques ?
- 4 Dans cette publication nous détaillerons les enjeux scientifiques associés à l'observation de la Terre, les solutions depuis l'espace réalistes qui sont à notre disposition, et la manière d'appréhender les différentes échelles de temps. Nous montrerons que les nouvelles plateformes émergentes peuvent apporter une aide précieuse pour mieux comprendre les processus physico-chimiques de petites échelles et mesurer l'impact de l'application – plus ou moins effective – des dispositifs réglementaires actuels et futurs.

Figure 1. Localisation des principales agences spatiales en rapport avec le budget dédié aux opérations spatiales



Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Portail:Astronautique>.

Stratégie d'observation de la Terre depuis l'espace

- 5 Pour observer la Terre, il convient de distinguer deux types d'orbite. L'orbite « géostationnaire », comme son nom l'indique, permet au satellite de tourner autour de la Terre à la vitesse de rotation de la Terre et ainsi être placé toujours au-dessus de la même région. D'une part, cette position est stratégique à plusieurs titres, notamment pour des applications quotidiennes. Elle permet d'assurer la communication au-dessus d'un territoire donné avec des antennes simples et fixes en permanence pointées vers le satellite, dispositif idéal pour la diffusion radio-télévisée, la téléphonie



et le positionnement. D'autre part, cette position éloignée mais fixe permet de produire des images fort utiles de la Terre et notamment centrées au-dessus des territoires sous le satellite. Nous connaissons tous ces images montrant le déplacement des nuages (très utile pour l'étude météorologique) et aussi pour la surveillance du territoire. Ce type d'orbite est donc très adapté aux applications centrées sur les besoins d'un pays ou d'une région et donc partie intégrante de l'infrastructure d'un pays et de sa politique de développement. D'un point de vue scientifique, elle présente en revanche quelques limites. La limitation principale de cette orbite est qu'elle se situe à 36 000 km de la surface de la Terre. Beaucoup d'informations provenant de la Terre et de son environnement sont transmises à distance par les ondes électromagnétiques (rayons X, lumineux et ondes radioélectriques) dont l'intensité varie selon le carré de la distance. Cette orbite, si elle permet un poste d'observation stable au-dessus d'un point de la Terre, n'est pas adaptée à une mesure précise. En outre, la recherche scientifique concernant la Terre comme un ensemble cohérent en interaction permanent avec des fluides et gaz en mouvement nécessite souvent une observation globale.

- 6 L'autre type d'orbite utilisée est appelé « basse orbite » et se situe typiquement entre 400 et 1200 km. Depuis cette altitude, il est évident que l'observation fine de notre atmosphère et de sa surface s'en trouve facilitée avec des signaux environ 1000 fois plus intense. Les plateformes positionnées sur cette orbite présentent la particularité de tourner autour de la Terre, permettant de voir défiler tout le globe, en particulier si le satellite passe par les pôles. Dans ce cas précis, il s'agit d'une orbite dite « héliosynchrone ». C'est souvent cette configuration qui est choisie pour les satellites scientifiques d'observation de la Terre, sauf si des observations spécifiques autour des pôles ou de la bande tropicale sont prioritaires. Dans ce cas, l'observation est donc globale. Le satellite fait 12 à 14 fois le tour de la Terre par jour et peut donc produire une carte journalière par interpolation des mesures d'une orbite à l'autre réalisées dans la même journée. Si l'on souhaite une mesure spatialement résolue, c'est-à-dire avec une empreinte au sol réduite et pas extrapolée spatialement entre deux orbites successives et décalées, alors plusieurs jours sont nécessaires avant de repasser au-dessus d'un même point. Pour résoudre ce problème, certains satellites sophistiqués sont pourvus d'un dispositif de balayage permettant de superposer les observations d'une orbite à l'autre (Clerbaux et al., 2009). La nécessité d'observation scientifique rejoint aujourd'hui les besoins commerciaux et sécuritaires qui investissent de plus en plus ces orbites basses avec des constellations de plusieurs centaines de satellites afin de couvrir un marché et des besoins globaux.

Les observations pour la recherche atmosphérique

- 7 Afin de représenter notre atmosphère, les scientifiques utilisent des modèles numériques permettant de résoudre les équations gouvernant le déplacement des masses d'air, les réactions physico-chimiques, et les interactions du rayonnement avec les différentes couches de l'atmosphère et la surface de la planète. L'atmosphère est ainsi divisée en une multitude de petites boîtes ayant des caractéristiques moyennes qui interagissent entre elles à une fréquence temporelle donnée, par le biais des lois atmosphériques mentionnées (Jacobson, 2005). La taille de ces boîtes donne les limites des résolutions spatiales de ces modèles dit eulériens. Les modèles de climat ont typiquement des résolutions entre 100 et 1000 km. Ces résolutions sont limitées par la puissance de calcul des ordinateurs mais s'améliorent en permanence. Certains des processus de petites échelles dits « sous mailles » (microphysique des nuages, échange avec la biosphère, ondes de petites échelles) ne sont pas représentés explicitement, mais leur effet moyen est simulé car ils peuvent parfois avoir une contribution importante (Stensrud, 2007).
- 8 Pour obtenir des observations, afin de valider les modèles, des réseaux d'observation ont été développés, sous la forme de stations si possible réparties régulièrement sur le globe (Bösenberg et al., 2002 ; Seidel et al., 2009 ; Staehelin et al., 2018 ; Calbet et al., 2022). Les observations peuvent être utilisées afin de corriger ou forcer la trajectoire du modèle via des processus connus sous le nom d'assimilation de données (Kalnay, 2002 ; Ash et al., 2016). Les informations en fonction de l'altitude sont fournies pour la météorologie ou la surveillance de l'ozone stratosphérique par des sondages météorologiques réguliers par ballon couvrant un domaine allant du sol jusqu'à 20-30 km d'altitude. Des campagnes d'inter-comparaisons sont organisées régulièrement afin d'assurer une cohérence spatiale (Keckhut et al., 2004 ; Nash et al., 2006). En revanche, les évolutions instrumentales réalisées sur les sondes induisent parfois des ruptures dans les séries, rendant la connaissance de l'évolution décennale parfois incertaine (Gaffen, 1994). Pour compléter ces sondages verticaux, dans les années 1970-80, il avait été imaginé de réaliser des vols de ballons de longue-durée afin de compléter le maillage (Lally et Lichfield, 1969). Cependant l'émergence



d'observations globales depuis l'espace (Vaughan et Dale, 1994) a rendu cette option obsolète. En effet, l'intérêt des mesures depuis l'espace permet d'observer l'ensemble du globe avec un même instrument alors que les sondages *in situ* par ballon nécessitent un nouveau capteur à chaque observation. Cette caractéristique est bien adaptée pour les questions climatiques, bien que la durée de vie dans l'espace des instruments soit limitée dans le temps du fait de l'hostilité du milieu dans lequel évoluent les satellites (changement de température, vide, rayonnement intense et vieillissement prématuré). Pour le domaine de l'atmosphère au-dessus du plafond permis par les ballons, des fusées sondes ont été utilisées principalement par les États-Unis et l'Union Soviétique des années 1960 aux années 1990. Ces données, bien que très utiles pour décrire cette région, présentent les mêmes difficultés et des coûts d'opération importants (Schmidlin, 1981).

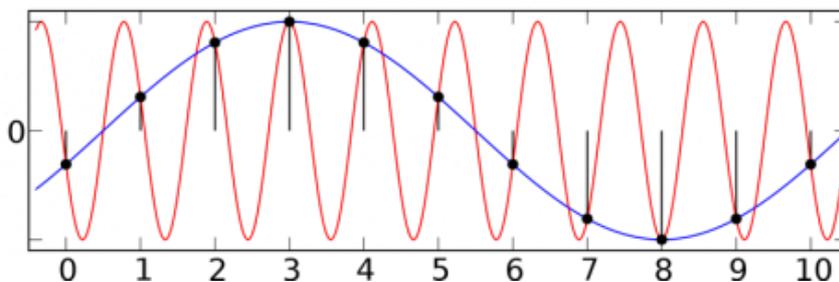
9 Les couches atmosphériques supérieures, qui composent l'Ionosphère (>100 km), sont également stratégiques car c'est dans ces couches qu'évoluent les satellites. Cette région, principalement pilotée par les fluctuations du champs magnétique et électrique de la Terre, est fortement influencée par l'activité solaire et les éjections de particules associées, et dans une moindre mesure par les couches atmosphériques plus basses. Ces fluctuations sont surveillées afin de protéger les satellites, et éventuellement les équipements électroniques sur Terre, et sont connues sous le vocable de météorologie de l'espace (*Space Weather*). Le soleil dans son ensemble doit donc être étudié et surveillé car la vie sur Terre et notre économie aujourd'hui en dépendent de manière importante. Très stable, le soleil a toutefois connu des périodes anormales qui ont déclenché des hivers rigoureux (Miyahara et al., 2010). Il présente une activité cyclique, notamment pour son rayonnement ultra-violet (UV) qui ne peut être observé que hors de l'atmosphère (Meftah et al., 2014).

Échantillonnage et variabilité atmosphérique

10 Les phénomènes extrêmes ou violents comme les cyclones, les éruptions volcaniques ou les tempêtes se développent sur des temporalités variables, allant de quelques heures à quelques jours ; ces phénomènes nécessitent une observation marquée par une répétabilité plus soutenue que la journée afin de suivre leur développement et anticiper leur impact. Le constat d'une telle nécessité est identique pour suivre des problèmes de pollution de nature anthropique (marée noire, émissions polluantes dans l'eau ou l'atmosphère).

11 De plus l'atmosphère connaît des cycles rapides notamment associés au cycle diurne. Du fait de la rotation du soleil, les processus atmosphériques varient en fonction de l'heure car pilotés par la lumière solaire (effet thermique, dissociation photochimique). Cette variation cyclique peut être constatée pour l'humidité, la température, la couverture nuageuse et les systèmes dépressifs (Chadalavada et al., 2022), la pollution, ou l'ozone à plus haute altitude (Keckhut et al., 2021) et de nombreuses autres variables. Si l'on observe une variable à une fréquence donnée et qu'il existe des variations de fortes amplitudes à des périodes plus petites que la fréquence d'échantillonnage, alors il apparaît un signal avec une fréquence apparente plus importante. Cet effet est connu sous le nom de théorème de Shannon, et est illustré par la figure 2. Ce schéma montre que si les observations sont réalisées à une périodicité plus grande que la demi-période des fluctuations naturelles, alors des signaux de plus grandes périodes apparaissent avec une mauvaise période sans que l'on puisse les séparer des fluctuations réelles à cette même période (Shannon, 1986). On parle de signaux « fantômes ».

Figure 2. Simulation illustrant le théorème de Shannon



Une observable ayant un cycle journalier par exemple (courbe rouge) si elle est observée avec une période plus grande (point noir) fera apparaître une fluctuation fantôme (artificielle) de même amplitude que le cycle annuel mais avec une période plus longue (courbe bleue), dans cet exemple avec une période de 10 jours

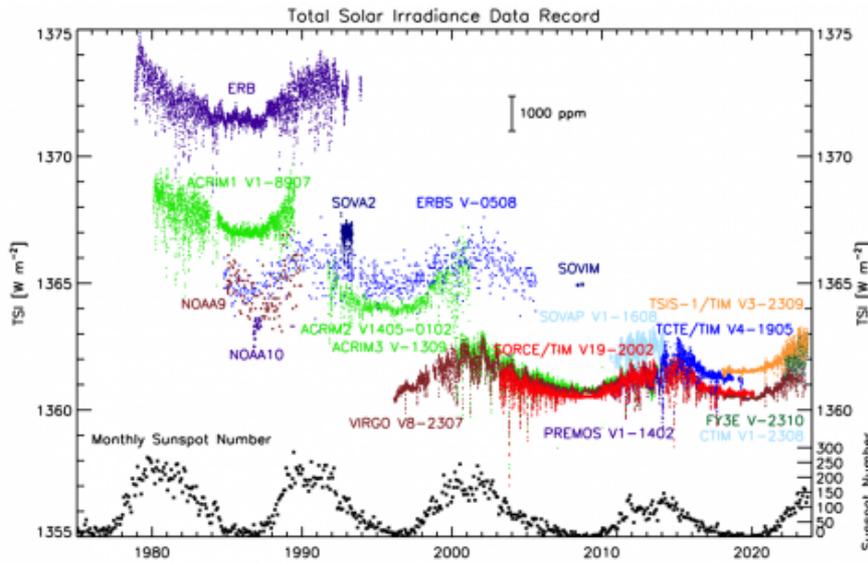
Source : réalisation des auteurs, illustration réalisée à partir du théorème de Shannon, 1986.



12 Les satellites d'observation se perfectionnent toujours plus et un soin particulier est apporté aux instruments embarqués afin de garantir leur fonctionnement dans l'espace et permettre une mesure absolue. Malgré les efforts importants déployés pour atteindre ces objectifs de qualité, la

surveillance n'est souvent possible qu'avec des instruments au sol, indispensables pour faire le lien entre les instruments qui se succèdent dans l'espace. L'observation des faibles variations à détecter par rapport à la variabilité naturelle reste souvent un défi difficile à relever. La continuité est souvent difficile à obtenir avec des instruments en évolution, utilisant des techniques différentes, et avec parfois des performances en amélioration constante. Ceci est un défi considérable lorsque que l'on s'intéresse aux changements climatiques ou à notre environnement. C'est ce type d'exercices qui fait l'objet de rapports scientifiques internationaux, comme ceux réalisés pour l'ozone (World Meteorological Organization, 2022) ou la mise en évidence des changements climatiques (Masson-Delmotte et al., 2021). Un autre exemple concerne l'éclairement solaire total qui est mesuré depuis la fin des années 1970 (figure 3). Plusieurs instruments spatiaux dont *Total Irradiance Monitor* (TIM) ou *Solar Variability Picard* (SOVAP) (Meftah et al., 2014) ont permis de suivre cette variable climatique essentielle depuis l'espace. Cette mesure doit se réaliser depuis l'espace, car une partie du spectre est absorbée par l'atmosphère. Ces observations sont des données essentielles pour l'évolution de la planète, mais de nombreux autres domaines font face à des difficultés de raccordement entre les observations similaires.

Figure 3. Observation d'Irradiance Solaire Totale (en anglais TSI) par des capteurs de haute technologie embarqués sur des plateformes successivement mises en orbite depuis 1978



Le cycle de 11 ans et les fluctuations plus rapides sont bien reproduites d'un capteur à l'autre mais les différences de mesures moyennes sont imputables à la calibration des différents instruments illustrant la difficulté de fournir des séries d'observation cohérente.

Source : d'après Kopp 2018.

13 Les satellites ont une durée de vie limitée dans l'espace. Au début de l'ère spatiale, les instruments étaient des prototypes de conception différente rendant la continuité de l'observation difficile. Pour répondre à cette problématique de surveillance, notamment pour les problématiques climatiques, l'European Space Agency (ESA) a identifié des instruments standards appelés « sentinelles » (Sanguy, 2014). Il s'agit d'instruments basés sur des technologies ayant fait leur preuve et permettant la mesure d'une variable dite essentielle (pour le climat). Les agences spatiales travaillent ensemble et s'assure qu'un instrument du même type est en permanence en orbite pour assurer la continuité. Si un grand champ de vue est utilisé alors les traces au sol se chevauchent pour deux orbites successives, et en une journée l'ensemble du globe sera couvert mais avec une résolution horizontale de plusieurs milliers de kilomètres correspondant à la distance entre deux orbites. Si le champ de vue est réduit, lors d'une journée un grand espace entre deux orbites ne sera pas sondé et il faudra attendre plusieurs jours pour repasser au-dessus d'un même point. Dans les deux cas, cette approche ne permet pas de garder une résolution horizontale fine. Dans la plupart des cas, si la mise en orbite d'un instrument similaire sur des plateformes successives permet d'assurer une certaine continuité de mesure, l'échantillonnage reste souvent insuffisant pour accéder aux résolutions spatio-temporelles correspondantes aux échelles des processus sous maille, et n'évite pas les interférences avec les cycles diurnes. Une façon de contourner ce problème, qui a largement été mobilisée par la météorologie, consiste à utiliser des modèles qui assimilent les observations et peuvent ainsi digérer des observations hétérogènes obtenues à des fréquences diverses. Cependant cette méthode reste insatisfaisante car elle ne fournit pas d'observations directes et dépend de la qualité du modèle numérique utilisé. Il apparaît en conséquence nécessaire de produire des observations plus fréquentes au-dessus d'un même point à la surface. C'est dans ce cadre que la constellation de satellite est apparue comme une solution. Comme présenté dans l'introduction, cette option a été choisie pour des besoins de télécommunications et, dans certains cas, par la météorologie, à l'instar de l'instrument



Interféromètre atmosphérique de sondage dans l'infrarouge (IASI) (Clerbaux et al., 2009) qui est prévu avec six instruments envoyés successivement, permettant d'avoir plusieurs instruments en orbite simultanément. Mais la multiplication des plateformes augmente les coûts de manière importante, ce qui – bien souvent – n'est pas compatible avec les budgets de la recherche.

14 Il n'est pas possible d'avoir une observation au-dessus d'un même point à une distance proche de la Terre pour réaliser des observations bien résolues. Il n'est pas possible de maintenir des plateformes sur des orbites inférieures à une altitude de 350-400 km sans les motoriser pour compenser leur chute. En revanche, aujourd'hui émergent des solutions à partir de ballons ou d'avions légers autonomes pouvant stationner dans la stratosphère (10-50 km) au-dessus d'une région. Dans la stratosphère, les aéronefs sont portés par le vent et peuvent être maintenus en altitude pendant plusieurs semaines, faisant plusieurs tours de la Terre. Pour rester au-dessus d'une même région, il est donc nécessaire de compenser la poussée du vent. En basse stratosphère, les vents sont de plusieurs dizaines de m/s. Il est donc nécessaire de minimiser leur extension verticale et utiliser l'énergie solaire pour compenser le vent d'où l'idée d'utiliser des ballons allongés type dirigeable ou des avions avec de grandes ailes type planneur. Une optimisation permanente est possible en se déplaçant à la verticale pour trouver les vents minimums ou contraires à différentes altitudes afin de rester au-dessus d'une même région.

15 Qu'il s'agisse d'utiliser des petites plateformes en grand nombre ou de les embarquer sous ballon ou drone avec un poids minimal, cette perspective nécessite de miniaturiser les capteurs et leur environnement. Ces deux approches nouvelles et complémentaires répondent aux nouveaux besoins car, d'une part, les ballons stationnaires en pouvant redescendre permettent un ré-étalonnage des instruments au sol et, d'autre part, les constellations en multipliant les observations permettent avec une approche d'intelligence artificielle d'accéder simultanément à la variabilité et aux défauts ou recalages des instruments entre eux.

Intérêt des *cubesats*

16 L'approche habituellement utilisée par la communauté scientifique, disposant jusque-là d'un seul prototype, nécessitait d'obtenir une mesure irréprochable et l'accès à une mesure absolue. En effet, l'instrument devait fournir la même qualité tout au long de ses orbites autour de la Terre, mais également fournir une mesure ne nécessitant pas d'étalonnage ou bien un étalonnage en vol intégré à la plateforme, du fait qu'il était impossible d'accéder physiquement à l'instrument. Obtenir une mesure dite « absolue » relève de la métrologie et est toujours un défi considérable car il est nécessaire quel que soit l'environnement de s'assurer que la mesure soit corrigée de tous les défauts et compense toutes les perturbations rencontrées. Cet objectif conduit à des instruments complexes, lourds, demandant un temps de développement long et donc coûteux. De ce fait, cette approche n'était pas favorable à la prise de risque. Des technologies ayant fait leur preuve sont, dans ce contexte, préférées à de nouvelles technologies non validées dans un environnement spatial. Ces instruments ont permis des observations globales mais comme indiqué dans le paragraphe 3, ils présentent des limites concernant l'échantillonnage en étant biaisés par les fluctuations de plus courtes périodes qui se trouvent sous-échantillonnées et sont parfois malgré tout sujettes à des dégradations dans le temps et des dérives des mesures. Souvent des observations, dites annexes, obtenues depuis le sol depuis des sites stratégiques sont associées à l'instrument dans l'espace pour s'assurer de son bon étalonnage.

17 La miniaturisation des plateformes permet de réduire les coûts, en premier lieu au lancement, du fait que le prix de revient est indexé sur le poids mis en orbite (Jones et al. 2020). Le coût du lancement reste une partie importante même si le coût a été divisé par dix avec les nouveaux lanceurs réutilisables. Dès lors que l'on mise sur la multiplication des instruments plutôt que sur la fourniture d'une mesure absolue, il est possible de miniaturiser les instruments en utilisant des capteurs plus simples tout en ayant une bonne sensibilité.

18 L'une des révolutions associées aux petites plateformes, appelées nanosat, dans la gamme de poids typique de 1-10 kg, est la définition d'un standard, en 1999, à l'initiative de Jordi Puig-Suari (CalTech University) et Bob Twiggs (Stanford University), qui ont l'idée de développer des plateformes à base de cubes de 10 cm de côté. L'intérêt de ce standard est, d'une part, d'offrir la possibilité d'utiliser un largage par la fusée via un système standardisé à base d'un ressort pour la mise en orbite puisque la section du satellite est un multiple de 10 cm. D'autre part, cette approche permet de développer des modules de base et des cartes électroniques standardisées à ce format permettant de dupliquer à l'identique des développements ayant fait leur preuve dans l'espace, mais également de commercialiser ces fonctions de base. Cette approche a pour conséquence de participer à l'abaissement des coûts et des délais de développement de la plateforme et du lancement.

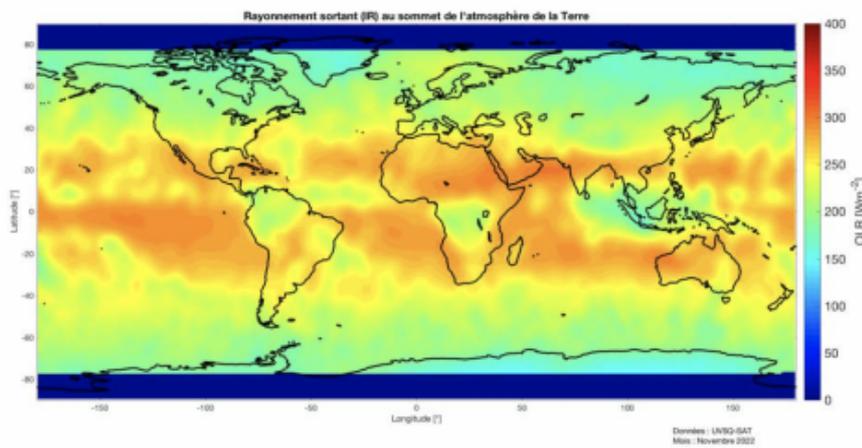
Avec ce type de capteurs miniaturisés montés sur un petit satellite placé sur une orbite basse



héliosynchrone (et donc défilante), il est possible d'établir une carte globale comme le montre l'exemple de la figure 4 concernant l'émission infra-rouge (IR) de la Terre. Le même capteur, observant la Terre tourner, permet de donner une image cohérente mais sans prétendre donner une valeur absolue par rapport aux capteurs plus sophistiqués et plus gros.

20 Lorsque l'on échantillonne un champs atmosphérique donné, avec une excellente résolution, avec un satellite, il apparaît qu'en interpolant les données d'une journée entière, la carte obtenue ne restitue pas un certain nombre de structures (voir les exemples simulés pour le rayonnement IR renvoyé par la Terre, dans Meftah et al., 2020, 2022). Pour répondre au sous-échantillonnage, il est donc nécessaire d'utiliser simultanément plusieurs plateformes sur des orbites complémentaires pour revenir plus fréquemment au-dessus d'un même point. La multiplication des plateformes permet également de résoudre la cohérence des différents capteurs. Comme cela est réalisé en météorologie, le processus d'assimilation de données se fait avec un modèle numérique qui permet de tester la cohérence et la qualité des observations en même temps que les données guide le modèle (Milan et al., 2015). Les orbites des plateformes se croisant régulièrement, il est donc possible avec des outils d'intelligence artificiel d'assurer un étalonnage croisé. Ceci correspond donc à un paradigme nouveau pour l'observation. On se contente de systèmes moins performants, concernant leur capacité à fournir une mesure absolue, mais plus nombreux. L'utilisation d'un capteur plus performant n'est pas en contradiction et s'avérera très utile pour compléter le dispositif ainsi que les observations opérées depuis le sol.

Figure 4. Carte des émissions infra-rouges (IR) donnée par les capteurs du Nanosat UVSQ-Sat



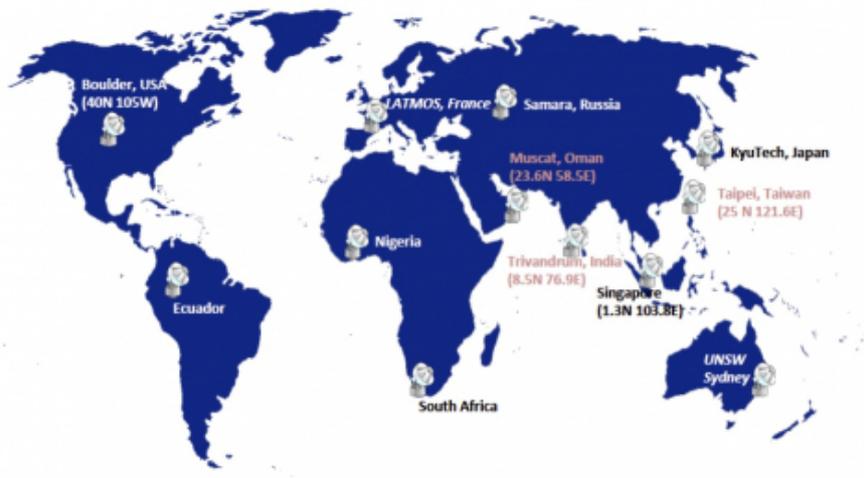
Meftah *et al.*, 2021.

21 Les coûts réduits des petites plateformes, du fait de la miniaturisation et de leur standardisation, permettent d'envisager le déploiement de constellations scientifiques avec de nombreuses plateformes, permettant des revisites plus fréquentes. Si chaque satellite est placé sur une orbite décalée par rapport à la précédente plateforme alors il passera quelques heures après au-dessus d'un même point. On peut citer la constellation de petits satellites d'étude du bilan radiatif (Meftah et al, 2022), ou les projets associés à la pluie et aux systèmes dépressifs (Peral et al., 2015, Blackwell et al., 2018) mais aussi aux problématiques d'étude de la densité de la thermosphère, qui a bénéficié d'un grand nombre d'observations grâce à la constellation QB50 (Asma et al, 2020) même si, dans ce cas-là, il ne s'agit pas d'une constellation mais de l'accumulation des données de plusieurs satellites.

22 Un autre enjeu porte sur la réception de données, la collaboration universitaire ou la participation de la communauté des radio-amateurs dans certains cas, lors d'utilisation de fréquences qui leur sont réservées permettant ainsi d'assurer une collecte des données plus fréquente, ce qui illustre l'intérêt de la collaboration internationale. Cette contribution, pouvant être modeste si elle est multipliée par plusieurs partenaires, permet aussi une implication dans les projets spatiaux d'un plus grand nombre d'acteurs. L'implication d'une communauté plus large est également une évolution nouvelle que l'on observe dans de nombreux domaines comme l'encyclopédie numérique, la science participative pour le comptage d'espèces pour la biodiversité, la récupération de météorites. L'accès du domaine spatial à une plus large communauté apparaît comme une évolution évidente, notamment quand il s'agit de problématiques liées à des enjeux universels comme le climat et plus généralement la surveillance de notre environnement.

Figure 5. Réseau d'antenne déployé par le réseau universitaire INSPIRE





Source : réseau INSPIRE <https://lasp.colorado.edu/inspire/>

- 23 Ces petits satellites ont déjà permis d’adresser des questions scientifiques comme l’étude du cycle de l’eau (Peral et al., 2019), les émissions X du soleil (Moore et al., 2018), ou le bilan radiatif de la Terre (Meftah et al., 2020). Aujourd’hui ils se perfectionnent et pourront se déplacer (Tummala and Dutta, 2017) et se désorbiter de manière autonome et laisser des orbites propres et réutilisables.

Intérêt des High-Altitude Platform Station (HAPS)

- 24 Les plateformes géostationnaires sont également très utiles pour la surveillance de notre planète en permettant de suivre rapidement les évolutions que ce soit pour des questions de changements environnementaux, de météorologie, de catastrophes naturelles, d’événements de pollutions (délibérés ou non), ou de sécurité. Cependant, la mécanique céleste ne permettant d’avoir des plateformes géostationnaires qu’à 36 000 km d’altitude, cet éloignement n’est pas propice à une observation de qualité. D’où l’idée d’avoir des plateformes évoluant dans la stratosphère (10-50 km) où, en permettant de se maintenir autour d’une région afin d’assurer une surveillance permanente mais de grande qualité grâce à la relative proximité (1000 fois meilleure que les satellites géostationnaires). La difficulté majeure pour maintenir une plateforme stationnaire à cette altitude porte sur la compensation du vent. Il est donc nécessaire de disposer d’un vecteur muni de moteur et pouvant rester en position quasi-stationnaire pendant des durées significatives et en autonomie. Aujourd’hui les projets concernent les drones (Schuyler and Guzman, 2017) et les plateformes stationnaires – de type planeur ou ballon dirigeable (Frulla, 2002 ; Goraj et al., 2004). Dans les deux cas, l’instrumentation a besoin d’être limitée en taille et en consommation pour que la charge scientifique ne rajoute pas de contraintes trop fortes au vecteur lui-même.

Impact géopolitique et perspectives pour la recherche

- 25 Les nouveaux défis et les nouveaux vecteurs d’observation montrent que l’observation obéit à de nouveaux paradigmes. Il est nécessaire de multiplier les observations afin de fournir une résolution spatio-temporelle compatible avec les objectifs de surveillance climatique et environnementale. Ces besoins pour l’étude et la surveillance de la planète sont proches des besoins sécuritaires qui nécessitent également des revisites fréquentes d’une même région. Cette stratégie est aujourd’hui envisageable grâce aux nouvelles plateformes spatiales. Il s’agit soit de multiples petites plateformes (nanosats), soit de plateformes stationnaires (HAPS). Les nouveaux outils numériques, notamment, permettent de gérer un flux de données important, à partir desquelles il est possible de tirer une information largement supérieure en croisant intelligemment l’information. À la suite des développements de systèmes sophistiqués et donc encombrants, consommateurs d’énergie, longs et coûteux à développer, est apparue la nécessité de disposer de capteurs miniaturisés adaptés aux conditions spatiales. Le concept de *cubesat* mériterait d’être généralisé et ce standard pourrait être utilisé sur d’autres plateformes en cours de développement, comme les HAPS, ballon en tous genres (stationnaire, captifs ou défilants), rovers, bouées, train, avion de ligne. Le cube de 10 cm pourrait être décliné avec d’autres dimensions si besoin. Cette



approche standardisée permettrait de faire naître un marché plus grand et de renforcer le processus de réduction des coûts. Ceci donnerait un accès plus facile – et à un plus grand nombre – à ce type d'instrumentation. La communauté scientifique et les startups profiteront d'outils pour une meilleure exploration et finalement pour la production d'un grand nombre d'observations pour l'étude de la planète et son évolution, comme l'a recommandé le GEOSS (Ryan and Ochiai, 2017).

26 Au-delà de la multiplication de plateformes pas toujours propices à une démarche environnementale recommandée, les plateformes commerciales (satellites, trains, autocars, bateaux) pourraient embarquer des capteurs d'observation comme une contribution à l'intérêt général de surveillance. Pour l'intérêt de la recherche, il existe déjà des exemples de cette démarche, comme l'installation de capteurs par la communauté scientifique sur des avions de ligne (Marengo, 2000). Ceci pourrait demain être considéré comme une obligation compensatoire (au moins partielle) de l'utilisation d'un espace public. Les nouvelles plateformes type nanosat, maintenant qu'elles ont fait la preuve de leur utilité et participé à créer un marché de sous-systèmes miniaturisés et génériques, les plateformes commerciales pourraient également être utilisées. Afin de réduire le nombre de plateformes en orbite, la communauté scientifique – avec ses capteurs miniaturisés – pourrait bénéficier de ces constellations commerciales qui se multiplient, ce qui réduirait l'encombrement des orbites.

27 L'apparition de satellites de petites tailles et l'émergence de plateformes stationnaires dans la stratosphère, couplées à des outils d'intelligence artificielle, ouvrent de nouvelles perspectives pour disposer d'informations supplémentaires sur la variabilité climatique et environnementale. Alors que les outils utilisés par la communauté scientifique impliquée dans l'observation de la Terre étaient encadrés par une stratégie nationale et gouvernementale, il s'opère un rapprochement croissant entre la recherche académique, l'industrie et les applications commerciales dans la mise à disposition de ces outils nouveaux. Cette synergie ne s'arrête pas à ces nouvelles plateformes et sous-systèmes, mais s'étend tout au contraire aux capteurs et données pouvant avoir des utilisations duales. La recherche autour du système Terre porte sur des paramètres permettant de mieux comprendre son fonctionnement et son évolution, mais également des observables stratégiques dans un contexte réglementaire qui se renforce, et un contexte géopolitique qui se durcit.

Conclusions

28 En montrant l'intérêt des petits satellites et en développant avec des partenaires industriels des solutions afin de réaliser des observations à moindre coût, la communauté scientifique a été disruptive. L'utilisation de nouveaux types de plateformes est recherchée par la communauté scientifique pour étudier, à l'échelle globale, les phénomènes rapides de temps caractéristiques inférieurs à la journée et avec une extension spatiale réduite de quelques 100 kilomètres. Ces plateformes, complémentaires des plus imposantes aujourd'hui existantes en orbite, nécessitent de miniaturiser les capteurs et instruments scientifiques et profitent de standards comme ceux des *cubesats*. Grâce à elles, il sera possible d'augmenter le nombre d'observations et de développer des approches d'analyse de mesure répondant à un nouveau paradigme où le nombre d'observations, manipulé avec les outils d'analyse d'intelligence artificielle, compensera la qualité (mesure absolue) qui était le Graal des scientifiques développant des instruments spatiaux. Ces nouvelles approches s'inscrivent dans une évolution qui, à certains égards, est similaire à celle du domaine commercial, et devraient faire émerger des synergies publiques/privés plus importantes.

Bibliographie

Asch, M., M. Bocquet et M. Nodet, 2016, *Data Assimilation: Methods, Algorithms, and Applications*, Society for Industrial and Applied Mathematics, ISBN: 9781611974539
DOI : 10.1137/1.9781611974546

Blackwell, WJ, Braun, S, Bennartz, R, et al. An overview of the TROPICS NASA Earth Venture Mission. *Q J R Meteorol Soc.* 2018; 144 (Suppl. 1): 16–26. <https://doi.org/10.1002/qj.3290>
DOI : 10.1002/qj.3290

Bösenberg, J. et al., 2002: EARLINET: Establishing the European Aerosol Research Lidar Network. In: L. Bissonnette, G. Roy, and G. Vallée (eds), *Lidar Remote Sensing in Atmospheric and Earth Sciences*, 535–539, Defence R&D Canada – Valcartier.

Calbet, X., Carbajal Henken, C., DeSouza-Machado, S., Sun, B., and Reale, T.: Horizontal small-scale variability of water vapor in the atmosphere: implications for intercomparison of data from different measuring systems, *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 7105–7118, <https://doi.org/10.5194/amt-15-7105-2022>, 2022.

DOI : 10.5194/amt-15-7105-2022

Cem Asma, Jonathan Naviaux, Gaëtan Kerschen, Roedeger Geinhard and Jean Muylaert, Orbital Dynamical Characteristics of a QB50 CubeSat performing atmospheric reentry, *AIAA 2010-7812. AIAA Atmospheric*



Clerbaux, C., Boynard, A., Clarisse, L., George, M., Hadji-Lazaro, J., Herbin, H., Hurtmans, D., Pommier, M., Razavi, A., Turquety, S., Wespes, C., and Coheur, P.-F.: Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6041–6054, <https://doi.org/10.5194/acp-9-6041-2009>, 2009.

DOI : 10.5194/acp-9-6041-2009

Coustenis, A., Kmínek, G., Hedman, N., Ammanito, E., Deshevaya, E., Doran, P.T., Grasset, O., Green, J., Hayes, A., Lei, L., Nakamura, A., Prieto-Ballesteros, O., Raulin, F., Rettberg, P., Sreekumar, P., Tsuneta, S., Viso, M., Zaitsev, M., Zorzano-Mier, M.-P., 2019 b. The COSPAR Panel on Planetary Protection role, structure and activities. *Space Res. Today*, vol. 205, August 2019, pages 14-26, <https://doi.org/10.1016/j.srt.2019.06.013>.

DOI : 10.1016/j.srt.2019.06.013

Frulla G. Preliminary reliability design of a solar-powered high-altitude very long endurance unmanned air vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2002;216(4):189-196. doi: <https://doi.org/10.1243/09544100260369722>

DOI : 10.1243/09544100260369722

Goraj et al., High altitude long endurance unmanned aerial vehicle of a new generation – a design challenge for a low cost, reliable and high performance aircraft, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*. Vol. 52, no. 3. Z., 2004.

Gaffen D. J., 1994 : Temporal inhomogeneities in radiosonde temperature records, *J. Geophys. Res.*, 99, 3667 – 3676, doi : <https://doi.org/10.1029/93JD03179>.

DOI : 10.1029/93JD03179

Jacobson M.Z., *Atmospheric Science and Meteorology, Mathematic, Earth and Environmental Sciences, Fluid Dynamics and Solid Mechannics*, Cambridge University Press, 2005, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139165389>.

DOI : 10.1017/CBO9781139165389

Jones H.W., *The Recent Large Reduction in Space Launch Cost*, Albuquerque, New Mexico: 48th International Conference on Environmental Systems, ICES-2018-81, July 8-12, 2018, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20200001093.pdf>.

Kalnay, E., 2002, *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 341 pp.

Keckhut, P., S. McDermid, D. Swart, T. McGee, S. Godin-Beekmann, A. Adriani, J. Barnes, J-L. Baray, H. Bencherif, H. Claude, G. Fiocco, G. Hansen, A. Hauchecorne, T. Leblanc, C.H. Lee, S. Pal, G. Megie, H. Nakane, R. Neuber, W. Steinbrecht, and J. Thayer, Review of ozone and temperature lidar validations performed within the framework of the Network for the Detection of Stratospheric Change, *J. Environ. Monit.*, 6, 721-733, 2004.

Keckhut, P., A. Hauchecorne, M. Meftah, S. Khaykin, C. Claud and P. Simoneau, Middle-atmosphere temperature monitoring addressed with a constellation of cubesats dedicated to climate issues, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, American Meteorological Society, 2021, (vol. 38, no. 3).

Kopp G., *Earth's Incoming Energy: The Total Solar Irradiance*, Chapter 5 in *Comprehensive Remote Sensing*, Elsevier, Editor Shunlin Liang, Pages 32-66, 2018, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10366-5>.

DOI : 10.1016/B978-0-12-409548-9.10366-5

Lally, V.E. ; Lichfield, E.W. (1969) Summary o status and plans for GHOST balloon project, *Bulletin of the American Meteorological Society*. 50 (11): 867–874, doi: <https://doi.org/10.1175/1520-0477-50.11.867>.

DOI : 10.1175/1520-0477-50.11.867

Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

DOI : 10.1017/9781009157896

Meftah M., Dewitte S., Irbah A., Chevalier A., Conscience C., Crommelynck D., Janssen E., Mekaoui S., *SOVAP/Picard, a spaceborne radiometer to measure the Total Solar Irradiance*, *Solar Physics*, 2014, 289 (5), pp.1885-1899. DOI : <https://doi.org/10.1007/s11207-013-0443-0>

DOI : 10.1007/s11207-013-0443-0

Meftah, M.; Damé, L. ; Keckhut, P.; Bekki, S.; Sarkissian, A.; Hauchecorne, A.; Bertran, E.; Carta, J.-P. ; Rogers, D. ; Abbaki, S.; Dufour, C. ; Gilbert, P. ; Lapauw, L.; Vieau, A.-J.; Arrateig, X.; Muscat, N. ; Bove, P.; Sandana, É.; Teherani, F.; Li, T. ; Pradel, G.; Mahé, M. ; Mercier, C. ; Paskeviciute, A.; Segura, K.; Berciano Alba, A. ; Aboulila, A.; Chang, L. ; Chandran, A.; Dahoo, P.-R.; Bui, UVSQ-SAT, a pathfinder cubesat mission for observing essential climate variables, *Remote Sensing*, MDPI, 2020, 12 (1), art. 92 (24 p.). doi: <https://doi.org/10.3390/rs12010092>.

DOI : 10.3390/rs12010092

Meftah M., T. Boutéraon, C. Dufour, A. Hauchecorne, P. Keckhut, A. Finance, S. Bekki, S. Abbaki, E. Bertran, L. Damé, J-L. Engler, P. Galopeau, P. Gilbert, L. Lapauw, A. Sarkissian, A-J. Vieau, P. Lacroix, N. Caignard, X. Arrateig, O. Hembise Fanton d'Andon, A. Mangin, J-P. Carta, F. Boust, M. Mahe, C. Mercier, The UBSQ-SAT/INSPIRESAT-5 cubesat mission: first in-orbit measurements of the earth's outgoing radiation, *Remote Sensing*, MDPI, 2021, 13, pp.1449. <https://doi.org/10.3390/rs13081449>

DOI : 10.3390/rs13081449

Meftah M., F. Boust, P. Keckhut, A. Sarkissian, T. Boutéraon, S. Bekki, L. Damé, P. Galopeau, A. Hauchecorne, C. Dufour, A. Finance, A-J. Vieau, E. Bertran, P. Gilbert, N. Caignard, C. Dias, J-L. Engler, P. Lacroix, K. Gossel, V. Rannou, S. Saillant, Y. Avelino, B. Azoulay, C. Brand, C. Dominguez, A. Haasz, A. Paskeviciute, K. Segura, P. Maso, S. Ancelin, C. Mercier, V. Stee, A. Mangin, D. Bolsée, C. Billard, INSPIRE-SAT 7, a second cubesat to measure the Earth's energy budget and to probe the ionosphere, *Remote Sensing*, MDPI, 2022, 14



(1), pp.186.

Milan, M., and L. Haimberger (2015), Predictors and grouping for bias correction of radiosonde temperature observations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 10,736–10,766, doi: <https://doi.org/10.1002/2015JD023635>.
DOI : 10.1002/2015JD023635

Miyahara, H. *et al.* Is the Sun heading for another Maunder Minimum? Precursors of the grand solar minima. *J. Cosmol.* 8, 1970–1982 (2010).

Moore, C.S., Caspi, A., Woods, T.N. *et al.* The Instruments and Capabilities of the *Miniature X-Ray Solar Spectrometer* (MinXSS) CubeSats. *Sol Phys* **293**, 21 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1243-3>
DOI : 10.1007/s11207-018-1243-3

Marengo, A., MOZAIC: five in-service airbus A340s evaluate impact of air traffic on atmosphere, *Air & Space Europe*, Volume 2, Issue 3, 2000, pp. 45-50, ISSN 1290-0958, [https://doi.org/10.1016/S1290-0958\(00\)80063-5](https://doi.org/10.1016/S1290-0958(00)80063-5).
DOI : 10.1016/S1290-0958(00)80063-5

Nash, J.,R. Smout, T. Oakley, B. Pathack, and Kurnosenko, 2006, WMO Intercomparaison of high-quality radiosonde systems, Vacoas, Mauritius, 2-25 February 2005 (2006). WMO IOM Report No. 83 WMO TD-1303.

NASA/AMES, *Small Spacecraft Technology - State of the Art*, NASA, octobre 2021, 428 p.: NASA/TP –20210021263

Pardhasai Chadalavada, Atri Dutta, Regional CubeSat Constellation Design to Monitor Hurricanes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 60, pg. 1, (2022); doi: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2021.3124473>
DOI : 10.1109/tgrs.2021.3124473

Peral, E., Tanelli S., Statham S., Joshi S., Imken T., Price D., Sauder J., Chahat N., Williams A., RainCube: the first ever radar measurements from a CubeSat in space, *Journal of Applied Remote Sensing* 13, p 32504, 2019, <https://doi.org/10.1117/1.JRS.13.032504>.
DOI : 10.1117/1.JRS.13.032504

Tummala, A.R. ; Dutta, A. An Overview of Cube-Satellite Propulsion Technologies and Trends. *Aerospace* 2017, 4, 58. <https://doi.org/10.3390/aerospace4040058>
DOI : 10.3390/aerospace4040058

Ryan, B., Ochiai, O. (2017), The New 10-Year GEOSS Strategy for 2016 and Beyond, In: Onoda, M., Young, O. (eds) *Satellite Earth Observations and Their Impact on Society and Policy*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3713-9_11
DOI : 10.1007/978-981-10-3713-9_11

Sanguy, M-A., Sentinel 1A-Première pierre spatiale du Copernicuss, *Espace & Exploration n° 21*, p. 30-33, 2014.

Schmidlin F.J., Repeatability and measurement uncertainty of the United States meteorological rocketsonde, *J. Geophys. Res.*, 86, 9599-9603, 1981.
DOI : 10.1029/JC086iC10p09599

Schuyler TJ, Guzman MI. Unmanned Aerial Systems for Monitoring Trace Tropospheric Gases. *Atmosphere*. 2017; 8(10):206. <https://doi.org/10.3390/atmos8100206>
DOI : 10.3390/atmos8100206

Seidel, D. J.; Berger, F. H. ; Diamond, H. J.; Dykema, J.; Goodrich, D.; Immler, F.; Murray, W. ; Peterson, T.; Sisterson, D.; Sommer, M. ; Thorne, P. ; Vömel, H. & Wang, J., Reference Upper-Air Observations for Climate: Rationale, Progress, and Plans. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90, 361–369, doi: <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2540.1>
DOI : 10.1175/2008BAMS2540.1

Shannon C.E., Communication in the Presence of Noise, *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, n° 2, 442-446, 1986.
DOI : 10.1109/PROC.1984.12998

Staehelin, J., I. Petropavlovskikh, M. De Mazière, S. Godin-Beekmann, The role and performance of ground-based networks in tracking the evolution of the ozone layer, *Comptes Rendus Geoscience*, v 350, Issue 7, 2018, pp. 354-367, <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.08.007>.
DOI : 10.1016/j.crte.2018.08.007

Stensrud, D.J., *Parameterization schemes : keys to understanding numerical weather prediction models*, Cambridge University Press, 2007, 459 p. (ISBN 978-0-521-86540-1)

Tummala, A.R. ; Dutta, A. An Overview of Cube-Satellite Propulsion Technologies and Trends. *Aerospace* 2017, 4, 58. <https://doi.org/10.3390/aerospace4040058>
DOI : 10.3390/aerospace4040058

Vaughan W.W., and D.L. Johnson, *Meteorological Satellite. The Very Early Years, Prior to Launch of TIROS-1*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1994, p. 8

World Meteorological Organization (WMO). Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022, GAW Report No. 278, 509 pp. ; WMO: Geneva, 2022

Table des illustrations



Titre

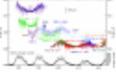
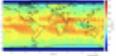
Figure 1. Localisation des principales agences spatiales en rapport avec le budget dédié aux opérations spatiales

Crédits

Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Portail:Astronautique>.

URL

<http://journals.openedition.org/espacepolitique/docannexe/image/12541/img-1.jpg>

	Fichier	image/jpeg, 92k
	Titre	Figure 2. Simulation illustrant le théorème de Shannon
	Légende	Une observable ayant un cycle journalier par exemple (courbe rouge) si elle est observée avec une période plus grande (point noir) fera apparaître une fluctuation fantôme (artificielle) de même amplitude que le cycle annuel mais avec une période plus longue (courbe bleue), dans cet exemple avec une période de 10 jours
	Crédits	Source : réalisation des auteurs, illustration réalisée à partir du théorème de Shannon, 1986.
	URL	http://journals.openedition.org/espacepolitique/docannexe/image/12541/img-2.png
	Fichier	image/png, 39k
	Titre	Figure 3. Observation d'Irradiance Solaire Totale (en anglais TSI) par des capteurs de haute technologie embranchés sur des plateformes successivement mises en orbite depuis 1978
	Légende	Le cycle de 11 ans et les fluctuations plus rapides sont bien reproduites d'un capteur à l'autre mais les différences de mesures moyennes sont imputables à la calibration des différents instruments illustrant la difficulté de fournir des séries d'observation cohérente.
	Crédits	Source : d'après Kopp 2018.
	URL	http://journals.openedition.org/espacepolitique/docannexe/image/12541/img-3.png
	Fichier	image/png, 467k
	Titre	Figure 4. Carte des émissions infra-rouges (IR) donnée par les capteurs du Nanosat UVSQ-Sat
	Crédits	Meftah <i>et al.</i> , 2021.
	URL	http://journals.openedition.org/espacepolitique/docannexe/image/12541/img-4.png
	Fichier	image/png, 1,7M
	Titre	Figure 5. Réseau d'antenne déployé par le réseau universitaire INSPIRE
	Crédits	Source : réseau INSPIRE https://lasp.colorado.edu/inspire/
	URL	http://journals.openedition.org/espacepolitique/docannexe/image/12541/img-5.jpg
	Fichier	image/jpeg, 138k

Pour citer cet article

Référence électronique

Philippe Keckhut, Mustapha Meftah et Laurence Croizé, « Observation de la Terre et du Soleil depuis l'espace : vers un changement de paradigme », *L'Espace Politique* [En ligne], 51-52 | 2023-3/2024-1, mis en ligne le 01 septembre 2024, consulté le 29 septembre 2024. URL : <http://journals.openedition.org/espacepolitique/12541>

Auteurs

Philippe Keckhut

Géophysicien, LATMOS-IPSL, CNRS/INSU, UMR 8190, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Université Paris-Saclay
philippe.keckhut@latmos.ipsl.fr

Articles du même auteur

Géopolitique de l'espace extra-atmosphérique [Texte intégral]

Geopolitics of outer space

Paru dans *L'Espace Politique*, 51-52 | 2023-3/2024-1

Mustapha Meftah

Astrophysicien, LATMOS-IPSL, CNRS/INSU, UMR 8190, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Université Paris-Saclay
mustapha.meftah@latmos.ipsl.fr

Laurence Croizé

Physicienne des sciences de l'ingénieur, département optique et techniques associées (DOTA), ONERA
laurence.croize@onera.fr

Droits d'auteur



Le texte seul est utilisable sous licence CC BY-NC-ND 4.0. Les autres éléments (illustrations, fichiers annexes importés) sont « Tous droits réservés », sauf mention contraire.

