

UVSQ

université PARIS-SACLAY

NANOTECHNOLOGIES : FOCUS SUR LES DÉTECTEURS DU PROJET ANR DEVINS POUR L'OBSERVATION SPATIALE DANS L'ULTRAVIOLET

Des premiers détecteurs, à base de diodes Hamamatsu, ont été intégrés sur le nanosatellite UVSQ-Sat mis en orbite fin janvier 2021

Mise en place préliminaire de l'éclairage

/alignement pour les tests des détecteurs

L'équipe du projet ANR DEVINS a conçu des détecteurs UV « Solar-blind » à base de technologies innovantes en -Ga₂O₃ et MgZnO pour l'observation du continu de Herzberg et la mesure de l'ozone stratosphérique. Ces nouveaux détecteurs à base d'oxydes seront intégrés sur le futur nanosatellite du LATMOS de l'Observatoire de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, INSPIRE 7/UVSQ-Sat+, dont le lancement est prévu fin 2022/début 2023.

Des premiers détecteurs, à base de diodes Hamamatsu, ont été intégrés sur le nanosatellite UVSQ-Sat mis en orbite fin janvier 2021.

Le succès de cette première mission et de ses détecteurs ouvre la voie vers l'utilisation des nouveaux détecteurs DEVINS.

Entretien avec Luc Damé, chercheur au LATMOS-OVSQ et coordinateur du projet.

Quels sont les principaux domaines d'étude des missions spatiales de détection dans l'ultraviolet, notamment à 200-240 nm et 240-320 nm objectifs jugés prioritaires dans le projet ANR DEVINS ?

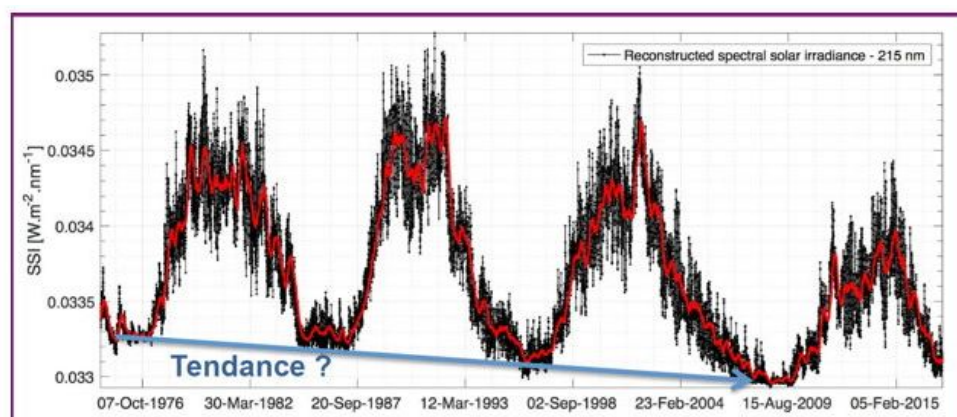
Luc Damé : Dans le cadre de nos travaux au LATMOS, nous nous intéressons à l'influence du Soleil sur le climat. A ce titre, certaines bandes de longueur d'onde au sein du spectre solaire sont plus intéressantes à étudier que d'autres car présentant plus de variabilité.

Tout d'abord il y a l'ultraviolet (UV). Les longueurs d'onde entre 200 et 242 nanomètres (le continu d'Herzberg), absorbées dans la stratosphère, provoquent la dissociation de l'oxygène et la création de la couche d'ozone. Ces réactions induisent des anomalies de température et de vitesse qui engendrent à leur tour des modifications du climat local (sur la couverture nuageuse, etc., affectant la vapeur d'eau dans l'atmosphère par exemple).

La bande de longueurs d'onde entre 240 et 320 nm est également intéressante pour la mesure directe de l'ozone. Des mesures effectuées 3 fois par jour, toutes les 8 heures, par une constellation de 25 à 50 petits satellites ou plus aux niveaux de l'équateur et des pôles sont requises pour évaluer correctement les influences locales sans moyenne /dilution des observables.

Par ailleurs, la raie à 280 nm du magnésium est aussi un objectif premier des missions. L'index du magnésium est un indicateur certain de la variabilité UV, aussi utilisé pour les

étoiles, qui demande cependant des mesures précises et des bandes passantes très étroites (inférieures à 5 nm).



Irradiance solaire spectrale à 215 nm sur les 40 dernières années (modèle SATIRE-S) : tendance à la baisse des minima solaires ? © Meftah, Damé, et al., 2020.

Les missions de détection dans l'UV visent plus généralement à étudier la variabilité climatique et les transferts d'énergie mais présentent également un intérêt majeur pour la physique solaire fondamentale. Il s'agit de répondre à des problématiques telles que : comment est produit l'UV ? L'amplitude des cycles solaires, d'une durée de 11 ans, diminue-t-elle ? Quelle est la nature de la dynamo solaire ? Etc. Des mesures suivies à 215 nm pendant plusieurs décennies permettront de mettre en évidence les tendances d'évolution du cycle solaire (actuellement orientée à la baisse, voir *Meftah, Damé, et al., 2020*).

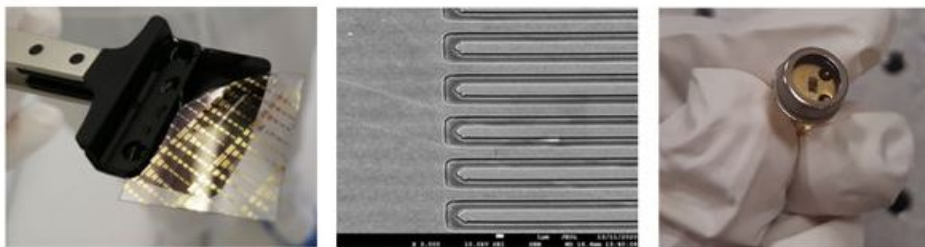
Le LATMOS de l'OVSQ s'intéresse également à l'ultraviolet lointain, en dessous de 200 nm et jusqu'à 120 nm (raie Lyman Alpha de l'hydrogène), qui est davantage variable que le continu d'Herzberg mais avec moins d'énergie, et donc avec une influence très limitée sur le climat. La bande 170-200 nm est cependant importante pour l'étude de la couronne solaire, et la raie Lyman Alpha est un remarquable traceur des éruptions solaires et des événements extrêmes qui peuvent affecter l'atmosphère terrestre ("Space Weather" ; météorologie de l'espace). Les technologies de détecteurs sont différentes à 120 nm (détecteurs diamants) mais méritent que l'on s'y intéresse dans l'avenir.

La détection dans l'UV nécessite quels besoins spécifiques ? Pour quelles raisons avez-vous orienté vos travaux vers l'utilisation des matériaux -Ga₂O₃ et MgZnO ?

Luc Damé : En vue d'une détection entre 200 et 240 nm, les flux étant faibles, un bon rapport signal/bruit est nécessaire pour mesurer le signal utile. La réponse spectrale du

détecteur doit être sensible entre 200 et 240 nm, centrée à 215-220 nm, avec une largeur à mi-hauteur réduite (de l'ordre de 20 nm) et une excellente réjection afin que le spectre visible, beaucoup plus intense, ne perturbe pas la mesure. Les matériaux oxydes ont cet avantage décisif : une réjection importante du visible (supérieure à 10^{-4} par rapport au pic de sensibilité) ajustable en longueur d'onde en fonction de l'oxyde choisi et de son dopage (voir Rogers et al., 2021). Ainsi, avec le $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ on peut obtenir une réponse maximum à 215 nm et une réjection à 240 nm de plus de 10^{-4} , et obtenir un excellent rapport signal/bruit. En pratique ces détecteurs sont dit « Solar Blind » à juste titre (pour le visible).

Dans le cadre du projet ANR DEVINS, nous utilisons des quarts de wafer de 2 pouces / 50,8 mm de diamètre (en pratique des plaques minces en saphir, de 330 μm / 1/3 de mm en épaisseur) sur lesquelles nous déposons une fine couche d'oxyde (de 50 à 200 nm ou plus), soit en $\text{-Ga}_2\text{O}_3$, soit en MgZnO , par une méthode de dépôt par "Laser Pulsé sous Ultravide". Nous créons ensuite en surface un réseau d'électrodes (dépôt d'or) en forme de peignes interdigités avec des doigts de 2 μm de largeur et pouvant atteindre 800 μm de longueur. Des centaines de photodétecteurs sont ainsi présents sur une même plaque. Les procédés de lithographie ont été optimisés (largeur des doigts, distance entre doigts, longueur des doigts, etc.) en collaboration avec l'Institut Lafayette à Metz. Pour les détecteurs DEVINS qui seront spatialisés nous convergeons actuellement vers une taille de détecteur assez impressionnante pour ces technologies, de 800 par 800 μm , avec des doigts de 2 μm seulement (en multipliant le nombre de doigts, on optimise la réponse).



A gauche : Quart de wafer de 2" avec lithographie expérimentale de détecteurs à base d'oxyde pour l'optimisation des caractéristiques géométriques © DEVINS. Au centre : Exemple de lithographie : 2 peignes interdigités de doigts de 2 μm de largeur © PIT/OVSQ Pierre Maso ; photo C. Vilar, GEMaC. A droite : Détecteur DEVINS UV (215 nm) de dernière génération dans son boîtier To-5 hermétique avec fenêtre saphir © DEVINS.

Les détecteurs DEVINS à base de $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ et MgZnO ont l'avantage d'être « Solar Blind » comme nous l'avons vu et, de fait, de présenter un très bon rapport signal/bruit que la réjection soit attendue à 240 (UV), à 285 (magnésium) ou à 320 nm (ozone). Puisqu'ils ne vont pas voir le flux solaire visible important, contrairement aux détecteurs en silicium, il n'est pas nécessaire de leur ajouter un filtre (qui diminue la réponse du système de détection). Leur réponse spectrale est bien adaptée pour une détection dans l'UV et notamment à 215 nm. Des réalisations, développements et essais sont encore en cours concernant la sensibilité des détecteurs mais une première estimation conservatrice de la

sensibilité à 215 nm serait très probablement autour de 100 mA soit 100 fois celle des diodes silicium au minimum.

Ceci étant, pour obtenir des mesures absolues il faut pouvoir maîtriser le suivi de la dégradation des détecteurs. Les détecteurs à base de $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ et MgZnO ont la particularité d'être plus stables que l'existant car ces matériaux sont peu sensibles aux radiations et aux rayons cosmiques. Ils ne devraient pas se dégrader rapidement contrairement aux détecteurs classiques à base de diodes silicium, très sensibles aux radiations. Leur résistance sera analysée en vol sur le satellite UVSQ-Sat+ dont le lancement est prévu fin 2022/début 2023 (voir ci-dessous). Enfin, le $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ supporte très bien les hauts voltages et est stable (une polarisation à -5V est imposée sur les nanosatellites mais ces détecteurs pourraient supporter bien plus et ainsi démultiplier leur réponse) ; d'autre part, le MgZnO peut être utilisé dans plusieurs états (cubique, etc.) et ainsi couvrir un large spectre de longueurs d'onde, de 190 à 320 nm.

Quels sont les apports de la collaboration entre les laboratoires du LATMOS, de l'OVSQ et l'entreprise Nanovation ?

Luc Damé : La collaboration avec Nanovation nous permet de bénéficier de leur procédé de dépôt de MgZnO et $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ sur wafer, par une méthode de "Laser Pulsé sous Ultravide". Il s'agit d'un procédé extrêmement innovant, performant et contrôlable pour la réalisation des prochaines générations de détecteurs ultraviolets à base d'oxydes - Ga_2O_3 . et MGZnO en particulier. Cette collaboration permet à Nanovation une application directe de leur procédé et savoir faire à des familles de détecteurs UV intéressants pour le domaine spatial, et illustre tout l'intérêt de ces (nano)technologies à base d'oxydes pour de futures applications.

Avez-vous pu intégrer ces détecteurs sur le nanosatellite UVSQ-Sat mis en orbite fin janvier 2021 par la fusée Falcon 9 opérée par SpaceX ?

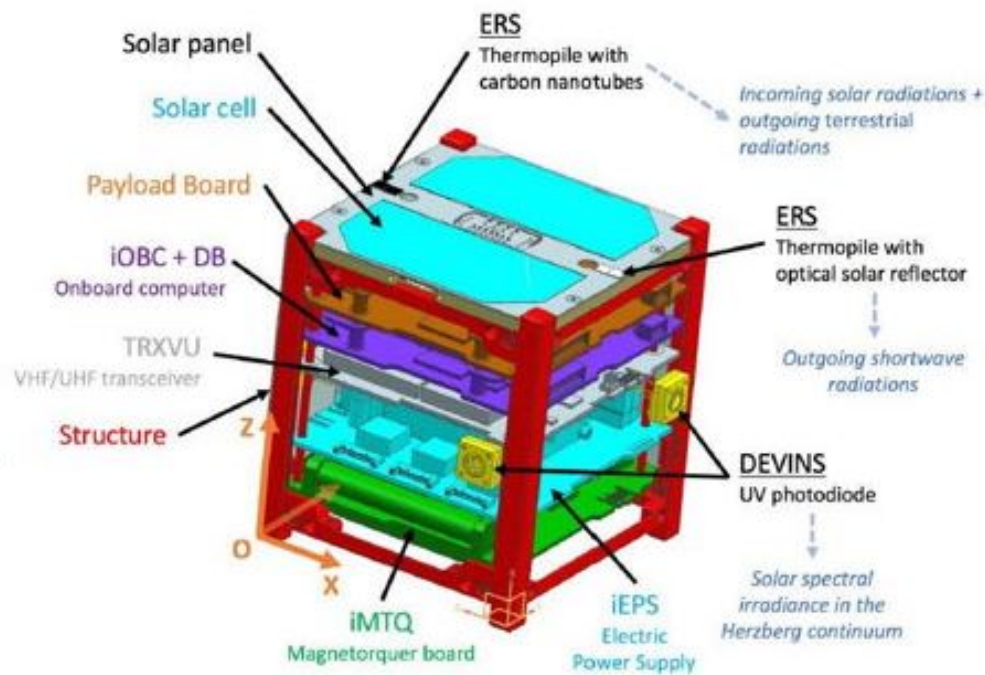
Luc Damé : Le nanosatellite UVSQ-Sat a été mis en orbite avec 143 autres satellites fin janvier 2021 depuis la Floride (un nouveau record de satellites mis en orbite en un seul lancement !). Il s'agit d'un satellite cubique "CubeSat" de 10 cm de côté environ (voir le schéma ci-contre) visant à étudier la variabilité UV, des variables climatiques, le bilan radiatif de la Terre et à tester/valider ces technologies et outils de mesure mis en œuvre.

Compte-tenu des retards liés au contexte sanitaire dans l'optimisation du packaging des détecteurs DEVINS, nous n'avons pas pu intégrer ces détecteurs spécifiques sur ce premier nanosatellite. Nous avons toutefois conçu et intégré dans UVSQ-Sat des détecteurs UV à 220 nm, à base de diodes classiques en silicium fabriquées par Hamamatsu, en leur associant un filtre approprié.

Le satellite UVSQ-Sat a été déclaré apte pour le service et les premières données sont en cours d'analyse (voir Meftah et al., 2021). UVSQ-Sat n'étant pas pointé, il est en légère rotation, l'extraction du signal UV est plus délicat qu'avec des détecteurs grand champ et demande une restitution d'orbite précise et les informations croisées des autres capteurs de notre charge utile. Nos travaux et tests d'intégration des détecteurs UV à base de diodes Hamamatsu sur UVSQ-Sat nous ont cependant permis de maîtriser entièrement la chaîne d'intégration de détecteurs sur un nanosatellite.

Quelles sont les prochaines étapes ?

Luc Damé : Nous nous appuyons sur ce processus validé pour intégrer nos détecteurs packagés DEVINS sur le second nanosatellite actuellement développé par les équipes du LATMOS, INSPIRE 7/UVSQ-Sat+. De type "2U" (20x10x10 cm), il devrait être mis en orbite fin 2022/début 2023 en collaboration avec l'ONERA pour effectuer notamment des mesures ionosphériques, stratosphériques (UV) et le bilan radiatif de la Terre. Nous espérons bien sûr une suite, afin de suivre la dégradation éventuelle de nos détecteurs dans le temps. Nous poursuivons actuellement le travail d'optimisation et de packaging des détecteurs DEVINS. A terme, l'enjeu est de développer une constellation de petits satellites avec des détecteurs étalonnés en absolu, afin des réaliser des mesures absolues du flux UV (suivi de la variabilité et du flux en absolu sur plusieurs cycles solaires).



Modèle représentatif du nanosatellite INSPIRE 5/UVSQ-Sat. Les deux instruments principaux de la charge utile sont représentés : les ERS (Earth Radiative Sensors) et les détecteurs UV DEVINS (DEep uV INnovative detector technologies for Space observations).
© Meftah, Damé, et al., 2020

Le projet ANR DEVINS (2018-2022), coordonné par Luc Damé, regroupe 3 partenaires :

- » Le Laboratoire "Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales" (LATMOS) qui appartient à l'Observatoire de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines
- » La Plateforme d'intégration et de tests de l'OVSQ (la PIT)
- » L'entreprise Nanovation.

INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

Références :

Meftah, M., Damé, L., Keckhut, P., et al., UVSQ-SAT, *a pathfinder CubeSat mission for observing Essential Climate Variables*, *Remote Sensing* 12, 92 (2020), doi:10.3390/rs12010092

Meftah, M., Boutéraon, T., Dufour, C., et al., The UVSQ-SAT/INSPIRESat-5 CubeSat Mission: First In-Orbit Measurements of the Earth's Outgoing Radiation, *Remote*

Sensing 13, 1449 (2021), doi: 10.3390/rs13081449

Rogers, D. J., Courtois, A., Teherani, F. H., et al., "Sharp/tuneable UVC selectivity and extreme solar blindness in nominally grown undoped Ga₂O₃ MSM photodetectors by pulsed laser deposition," Proc. SPIE 11687, Oxide-based Materials and Devices XII, 116872D (24 March 2021), doi: 10.1117/12.2596194