



**Nous sommes ravis
de vous présenter la deuxième
édition de la newsletter scientifique
du CNES !**

Le Centre National d'Études Spatiales (CNES) a le plaisir de vous dévoiler une nouvelle sélection d'articles dans le domaine **des sciences de l'Univers, de l'exploration spatiale et de l'observation de la Terre depuis l'espace**, illustrant son engagement dans la recherche scientifique du domaine spatial.

Dans un monde en constante évolution, où les défis environnementaux et technologiques se multiplient, la science et l'innovation jouent un rôle crucial.

Cette newsletter poursuit sa vocation de vous tenir informés des avancées majeures de la recherche concernant les projets et missions soutenus par le CNES en collaboration avec ses partenaires nationaux et internationaux. Nous espérons que ces contenus susciteront votre curiosité et vous inviteront à suivre de plus près les activités scientifiques du CNES.

Ensemble, continuons à explorer les dernières découvertes de la recherche spatiale et à faire avancer la science pour le progrès de l'humanité.

Bonne lecture !

L'équipe de la newsletter scientifique du CNES

Contact :

NewsSciencesCnes@cnes.fr

Comité de rédaction

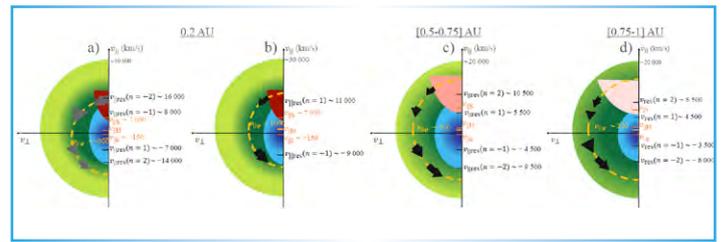
Martin Boutelier - Maxime Brient - Valérie Frède
Alice Lebreton - Sophie Le Gac - Mioara Mandea

L'influence des ondes de sifflement mise en évidence par Solar Orbiter et Parker Solar Probe

La structure électronique du vent solaire possède trois composantes principales : le cœur du vent solaire composé d'électrons à basse énergie est la composante majoritaire (95% des électrons du vent solaire) ; le halo composé d'électrons suprathermiques de plus haute énergie ; la composante de Strahl constituée d'électrons de haute énergie se propageant le long des lignes de champ magnétique. La structuration de ces trois composantes évolue avec la distance au soleil selon des mécanismes qui ne sont pas complètement élucidés. Les ondes de sifflement constituent des candidates naturelles pour expliquer cette structuration. Elles ont déjà été largement observées à des distances inférieures à 1 unité astronomique mais pour autant, la quantification de leur interaction avec les électrons n'a jamais été menée. En analysant plus de 110 000 trains d'onde de sifflements enregistrés par les instruments RPW de la mission Solar Orbiter et FIELDS de la mission Parker Solar Probe, une équipe de scientifiques internationale menée par le LPC2E a quantifié l'effet de ces ondes sur l'évolution de la composante de Strahl et l'isotropisation de la composante de halo. Pour la première fois, elle a caractérisé les paramètres principaux de ces ondes de sifflements et mesuré l'impact et l'efficacité des mécanismes de diffusion des électrons suprathermiques de la composante de Strahl.

Rôle du CNES

Le CNES a intégré, testé et fourni l'instrument RPW et a participé à la réalisation de 5 autres instruments (SWA, EUI, STIX, SOPHI et SPICE) de la mission Solar Orbiter. Le CNES soutient financièrement les équipes de recherche en charge de l'exploitation des données des missions d'étude de l'environnement solaire via son Appel à Proposition de Recherche.



LÉGENDE : Vue schématique des fonctions de distribution de vitesse des électrons du vent solaire pour différentes distances héliocentriques. Chaque élément de la figure illustre le processus de diffusion provoqué par les ondes de sifflements : une instabilité est créée par un excès d'énergie dans la fonction de distribution ; cette instabilité crée une onde de sifflement qui interagit avec la distribution des électrons. Les cercles bleus représentent les électrons du cœur du vent solaire ; les cercles verts les électrons du halo, la zone rouge/rose les électrons de Strahl. L'intensité des couleurs est fonction de la densité relative de population. Les flèches indiquent le chemin suivi par les électrons diffusés. Le rôle de ces électrons sur l'amplification (ou l'atténuation) des ondes de sifflements est indiqué par la couleur noire (ou grise) de la flèche. Crédits : L. Colombari et al.

Référence publication : L. Colombari et al., Quantifying the diffusion of suprathermal electrons by whistler waves between 0.2 and 1 AU with Solar Orbiter and Parker Solar Probe, *A&A*, **684**, A143 (2024), DOI : [10.1051/0004-6361/202347489](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202347489).

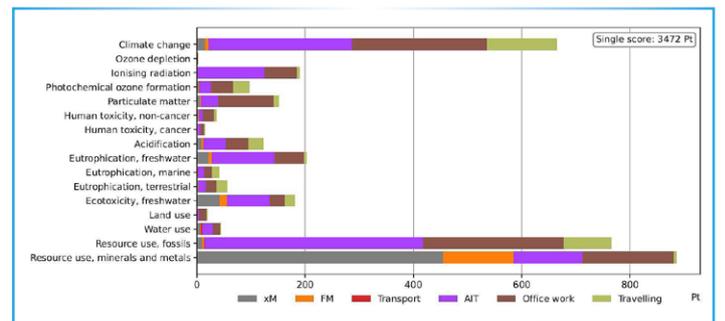
L'instrument X-IFU mesure son impact environnemental

Comme les autres projets scientifiques actuels, l'instrument X-IFU se développe dans un contexte où plusieurs processus critiques pour la stabilité de la Terre sont déjà affectés par les activités humaines. Par ailleurs, il devient de plus en plus évident que sans réductions immédiates et drastiques des émissions de gaz à effet de serre, dans tous les secteurs, l'objectif de l'accord de Paris de limiter le réchauffement à 1,5°C ne peut être atteint. Dans ce contexte, une équipe d'ingénieurs et de scientifiques issus du consortium scientifique X-IFU a mené une analyse de cycle de vie pour estimer l'impact environnemental associé au développement de l'instrument X-IFU et des sous-systèmes sous la responsabilité du consortium.

Cette étude montre que les impacts environnementaux les plus importants proviennent des activités de tests, principalement de la consommation des salles blanches, du travail de bureau lié à l'impact de la consommation énergétique des bâtiments et de la fabrication des différents modèles du fait de la consommation de matières premières. Cette étude, la première pour un instrument spatial dédié à l'astronomie, doit servir à mettre en place un plan d'action visant à réduire l'empreinte environnementale du projet.

Rôle du CNES

Le CNES assure la maîtrise d'œuvre de l'instrument X-IFU prévu à bord de la future mission NewAthena de l'ESA. Il apporte également son soutien aux projets scientifiques à travers sa direction du développement durable pour conduire les analyses d'impact environnemental.

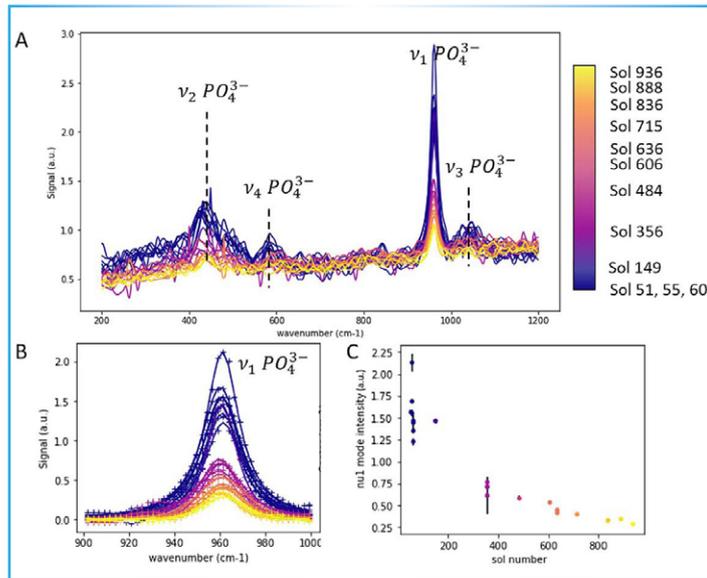


LÉGENDE : Empreinte environnementale de l'instrument X-IFU de la mission Athena (dans sa configuration datant de 2022). Les 3 activités les plus contributrices à l'empreinte environnementale sont l'AIT, le travail de bureau et la fabrication des différents modèles (STM, EM, QM – résumés sous l'acronyme xM – et FM). L'impact le plus important concerne le changement climatique, la consommation d'énergies fossiles et la consommation de matières premières. Son empreinte environnementale est équivalente à celle annuelle de 3472 humains moyens, correspondant à une émission cumulée de ~25 000 tonnes équivalent-CO₂. A noter qu'une seconde analyse de cycle de vie de X-IFU (dans sa configuration 2024) est en cours de réalisation à l'IRAP. Crédits : D. Barret et al.

Référence publication : D. Barret et al., Life Cycle Assessment of the Athena X-ray Integral Field Unit, *Exp Astron* **57**, 19 (2024), DOI : [10.1007/s10686-024-09939-7](https://doi.org/10.1007/s10686-024-09939-7).

Avec Persévérance, l'appétit vient en explorant, l'apatite s'en va en roulant !

L'exploration planétaire repose essentiellement sur la caractérisation minéralogique à travers le système solaire pour comprendre les mécanismes de formation et d'évolution des planètes. La spectroscopie Raman est l'une des techniques les plus intéressantes pour l'analyse minéralogique et organique et plusieurs instruments Raman ont été proposés dans les dernières décennies pour réaliser des analyses *in situ* sur des planètes comme Mars. Pour exploiter ce type d'analyse, il est essentiel de caractériser les processus d'altération des matériaux qui peuvent affecter les données.



Une équipe de scientifiques a analysé 3 ans de profils de calibration du spectromètre Raman SuperCam sur une cible minérale de test d'apatite. L'analyse montre une diminution significative du signal. L'hypothèse la plus probable est le vieillissement de la cible d'apatite sous l'effet des UV entraînant des désordres cristallins. Ce résultat a des conséquences importantes sur la stratégie d'étude des roches martiennes et la recherche de traces de vie qui doit se concentrer sur les matériaux de subsurface. C'est la stratégie adoptée pour la future mission ExoMars.

Rôle du CNES

Le CNES a assuré la responsabilité de la conception et de la fabrication de la partie française de l'instrument SuperCam. Les opérations sont dirigées depuis le FOCSE au CNES à Toulouse. Le CNES finance également les scientifiques responsables de l'analyse des données de l'instrument SuperCam à travers son programme d'Appel à Proposition de Recherche et son programme de thèse et de post doctorats.

LÉGENDE : Evolution dans le temps du spectre Raman de la cible d'apatite présente à bord du rover Persévérance. L'amplitude du signal Raman a nettement diminué entre les sols (jours martiens) 51 et 936. L'hypothèse la plus probable est le vieillissement du matériel sous l'exposition journalière aux UV. Crédits : E. Clavé et al.

Référence publication : E. Clavé et al., Radiation-induced alteration of apatite on the surface of Mars: first *in situ* observations with SuperCam Raman onboard Perseverance, *Sci Rep* **14**, 11284 (2024),

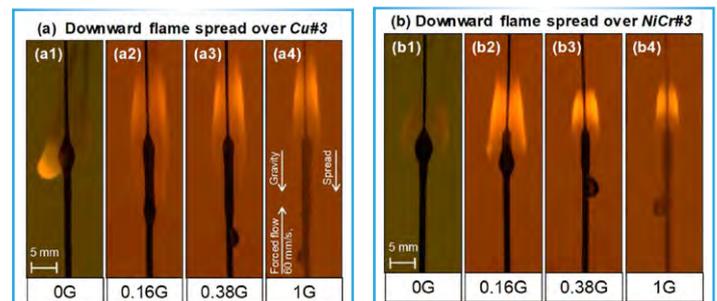
[DOI : 10.1038/s41598-024-61494-5](https://doi.org/10.1038/s41598-024-61494-5).

La propagation du feu le long de fils électriques modifiée par les conditions de microgravité

Le feu représente l'un des risques majeurs pour les équipages dans les missions d'exploration spatiale. Comprendre les effets de la gravité sur les processus de déclenchement et de propagation du feu est donc essentiel, en particulier dans un contexte où l'exploration humaine prend une ampleur inédite avec le programme d'exploration américain Artémis. Une équipe internationale, principalement composée de scientifiques japonais et français, collabore sur ce sujet depuis plus de 10 ans. Elle a en particulier mesuré les effets de la microgravité sur la vitesse de propagation des flammes le long de fils électriques et sur la concentration limite en oxygène nécessaire pour l'apparition d'un feu. Lors d'une campagne de vol 0G, les scientifiques ont montré que des fils électriques ayant une âme peu conductrice thermiquement comme l'alliage Nickel Chrome, deviennent plus inflammables en condition de microgravité. Ces résultats ont été récompensés en juin 2024 par un Distinguished Award Paper lors du 39^e symposium international sur la combustion.

Rôle du CNES

Le CNES finance l'équipe de scientifiques à travers son Appel à Proposition de Recherche et offre l'opportunité pour cette expérience de voler à bord de l'Airbus A310 de Novespace.



LÉGENDE : Propagation de la flamme sur un fil électrique de cuivre isolé (figure a) et sur un fil électrique de Nickel Chrome (figure b) dans différentes conditions de gravité. La forme de la flamme et de la gaine isolante fondue est affectée par les conditions de gravité. Crédits : Y. Konno et al.

Référence publication : Y. Konno et al., Experimental study on downward/opposed flame spread and extinction over electric wires in partial gravity environments, *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume **39**, Issue 3 (2023), p3785-3794,

[DOI : 10.1016/j.proci.2022.07.002](https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.07.002).

Une nouvelle échelle pour la convection mantellique via l'observation géophysique

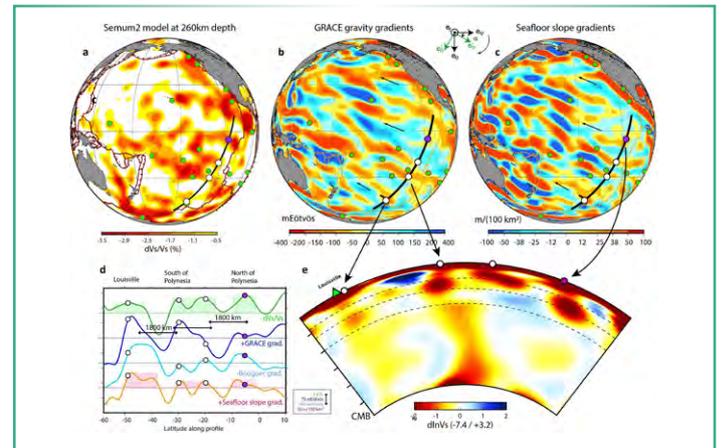
À seulement quelques centaines de kilomètres sous nos pieds, de nombreux aspects de la dynamique du manteau restent encore à découvrir. Dans une étude récente, des ondulations spatiales de 2000 km de longueur d'onde alignées avec le mouvement actuel des plaques tectoniques dans les océans Pacifique et Indien ont été observées dans le géoïde GRACE et la bathymétrie océanique. Elles coïncident géographiquement avec des anomalies lentes de vitesses sismiques dans le manteau supérieur et la zone de transition. Ces signaux suggèrent la présence d'une convection méso-échelle du manteau, qui ne provient pas uniquement de variations de température : des excès de masse doivent être présents dans les zones chaudes.

Cette étude présente des bilans de masse dans le manteau qui intègrent ces contraintes observationnelles. Ces bilans permettent de développer un modèle simplifié de convection thermo-chimique bi-dimensionnelle s'étendant jusqu'à 1000 km de profondeur, qui résulterait au moins en partie de forçages profonds et pourrait ainsi partiellement contrôler le mouvement des plaques tectoniques. Les excès de masse dans les courants ascendants s'expliquent par une fusion partielle des roches au moment de leur changement de phase. Celles-ci se déshydratent au sommet de la zone de transition, et produisent des matériaux enrichis en fer. Combinant différentes observables géophysiques à des échelles intermédiaires peu étudiées, ces résultats étayent la présence d'eau dans la zone de transition.

Rôle du CNES

Le modèle de champ de gravité étudié est produit par le CNES dans le cadre de l'International Gravity Field Service (IGFS) et accessible via le pôle de données et de services FormaTerre de DataTerra. La carte de

bathymétrie a été construite à partir de données Cryosat-2, Jason-1 et Envisat. Ce travail a bénéficié de financements d'accompagnement scientifique (APR) du CNES.



LÉGENDE : Les ondulations du géoïde et de la bathymétrie alignées avec la direction actuelle du mouvement de la plaque Pacifique, exprimées en gradients de gravité (gauche) et en gradients de pentes des fonds océaniques (droite), et leur correspondance avec les vitesses sismiques lentes (bas). L'ensemble de ces signaux s'explique par une convection thermo-chimique méso-échelle dans le manteau supérieur et la zone de transition étendue, avec fusion partielle et recristallisation des roches en profondeur. Crédits : I. Panet et al.

Référence publication : I. Panet et al., *Partial melt in mesoscale upper mantle upwellings beneath ocean basins*, *Earth and Planetary Science Letters*, 639 (2024), DOI : [10.1016/j.epsl.2024.118763](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.118763).

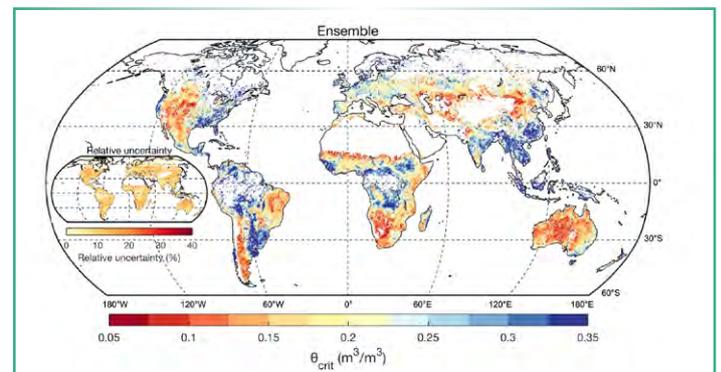
La détermination précise des seuils critiques d'humidité du sol permet de mieux comprendre l'apparition du stress hydrique des plantes

Pendant de longues périodes sans pluie, la baisse du niveau de l'humidité du sol au-dessous d'un seuil critique, induit un stress hydrique des plantes en limitant l'évapotranspiration. Une meilleure quantification de ce seuil critique est nécessaire pour améliorer la compréhension de la réponse des écosystèmes terrestres au changement climatique et aux rétroactions entre la terre et l'atmosphère. En combinant différentes observations (dont celles issues du satellite SMOS) et utilisant une méthode basée sur de l'intelligence artificielle (machine learning), une équipe internationale de chercheurs a, pour la première fois, généré une carte globale précise des variations spatiales de ce seuil et identifié les principaux facteurs environnementaux le contraignant.

Les résultats indiquent que le seuil global moyen varie en fonction de l'humidité de la zone reflétant ainsi l'adaptation des plantes à l'eau disponible dans le sol et aux contraintes atmosphériques, tout en soulignant les limites des valeurs de ce seuil obtenues par simulation. Cette étude a également permis d'identifier une augmentation des périodes de stress hydrique des écosystèmes terrestres au cours des quatre dernières décennies. Ces résultats sont la clé pour améliorer les modèles en vue de mieux comprendre l'apparition du stress hydrique et permettre l'identification des points de basculement liés au réchauffement climatique : à long terme, la dégradation généralisée des écosystèmes entraînera une diminution voire une perte des services écosystémiques.

Rôle du CNES

Le CNES a financé le post-doctorat de l'auteur principal, Zheng Fu, au LSCE/IPSL.



LÉGENDE : Distribution globale du seuil critique d'humidité des sols et incertitude relative en encart. Crédits : Z. Fu et al.

Référence publication : Z. Fu et al., *Global critical soil moisture thresholds of plant water stress*, *Nature Communications*, 15, n° 4826 (2024), DOI : [10.1038/s41467-024-49244-7](https://doi.org/10.1038/s41467-024-49244-7).

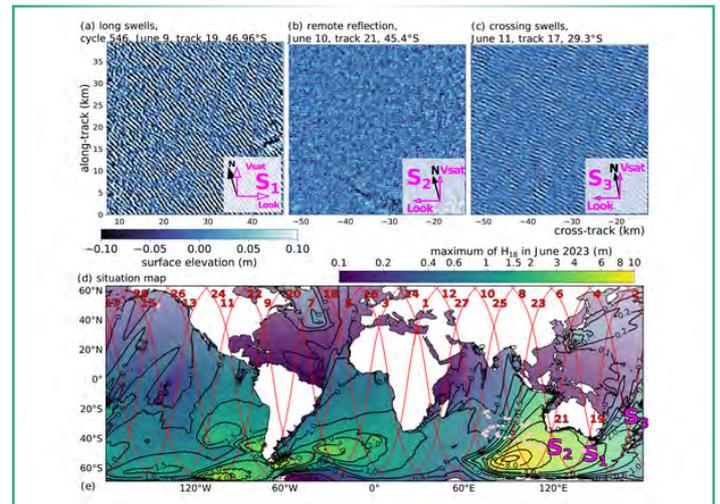
Les ondes longues caractéristiques de la houle océanique enfin révélées par SWOT

Les vagues océaniques sont caractérisées par leur hauteur, leur période (ou leur longueur d'onde) et leur direction. Les vagues les plus intenses, dont la période est supérieure à 18 secondes, sont communément associées à la houle, qui se propage sur de longues distances au travers des bassins océaniques. Un défi consiste à mesurer avec précision cette houle depuis l'espace, en particulier pour la houle dont la hauteur significative n'excède pas 20 cm.

Dans cette étude internationale menée par une équipe française, la mission SWOT, lancée en décembre 2022, permet enfin de détecter et de résoudre ces phénomènes avec une précision inégalée jusqu'à présent. Les chercheurs ont étudié en particulier les observations des vagues générées par une forte tempête en juin 2023 dans l'Océan Austral. Dans ce cas précis, des vagues de plus de 17 mètres ont été prédites et de nombreux trains de houle se sont propagés. Cet événement permet de fournir la première validation des observations de la houle océanique par SWOT, ainsi que des ondes réfléchies lorsque la houle rencontre des côtes ou des îles. Grâce à une analyse approfondie des spectres de vagues ainsi détectées et la comparaison à des données de bouées ou de modèles, cette étude démontre la qualité et la précision des mesures SWOT, promettant des avancées remarquables dans la connaissance et la caractérisation de la houle.

Rôle du CNES

La mission SWOT est une mission conjointe entre le CNES et la NASA. Les données SWOT sont traitées au CNES et mises à disposition de la communauté scientifique via le service de diffusion de données altimétriques Aviso.



LÉGENDE : Représentation de la hauteur de la surface de la mer observée par SWOT dans 3 zones (S1, S2, S3 au sud de l'Australie), montrant (a) de la houle (b) des ondes réfléchies et (c) de la houle croisée. La cartographie montre, en dégradé de couleurs, la hauteur significative maximale des vagues observées par SWOT (trajectoires rouges) en juin 2023, ainsi que l'emplacement de bouées in-situ utilisées dans l'étude. Crédits : F. Arduin et al.

Référence publication : F. Arduin et al., *Phase-Resolved Swells Across Ocean Basins in SWOT Altimetry Data: Revealing Centimeter-Scale Wave Heights Including Coastal Reflection*, *Geophysical Research Letters*, **51** (16) (2024), DOI : [10.1029/2024GL109658](https://doi.org/10.1029/2024GL109658).

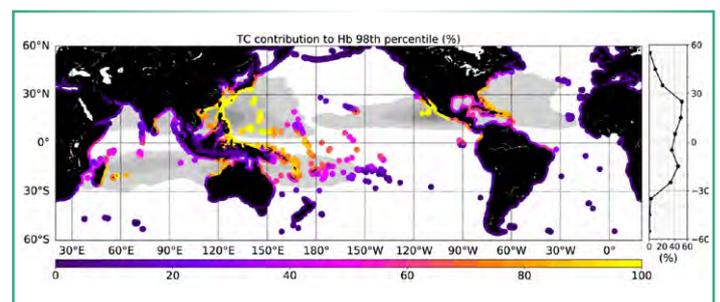
Les cyclones tropicaux contribuent à la propagation de fortes vagues sur les côtes mondiales.

Les tempêtes tropicales et extratropicales, par forçage du vent à la surface de l'océan, génèrent de fortes vagues à l'origine d'effets dévastateurs dans les zones tropicales mais impactent également des zones plus éloignées, par propagation de la houle qu'ils génèrent. Afin de mieux quantifier cet impact et évaluer les conséquences sur les littoraux, une équipe de chercheurs français a comparé des simulations de vagues océaniques induites -ou non- par des cyclones tropicaux : ils montrent que les cyclones tropicaux contribueraient de manière significative aux déferlements de vagues intenses sur les côtes, y compris dans des régions éloignées et non affectées par les cyclones. L'étude de leur variabilité interannuelle montre également une corrélation entre les épisodes El Niño et le déferlement de ces vagues extrêmes, en particulier dans le Pacifique central.

La quantification précise des risques côtiers liés aux cyclones est essentielle dans un contexte global de réchauffement climatique, d'élévation du niveau de la mer, et de l'augmentation du nombre de cas extrêmes. Cette recherche offre ainsi des informations essentielles pour la gestion et la préparation à ces risques à l'échelle mondiale. Enfin, l'étude souligne la nécessité de s'appuyer sur des mesures spectrales (i.e. issues de CFOSAT/SWIM) plus précises des caractéristiques des vagues pour pouvoir mieux évaluer les risques associés.

Rôle du CNES

Le CNES a financé une partie de ces travaux via le projet LAGOON axé sur la mission CFOSAT (mission conjointe entre le CNES et le CNSA).



LÉGENDE : Cartographie (à gauche) et moyenne zonale (à droite) de la contribution des cyclones tropicaux aux fortes vagues. La contribution est calculée comme la différence relative (en %) entre la simulation incluant le forçage induit par les cyclones tropicaux et la simulation excluant ce forçage dans le nombre d'occurrences au-dessus du 98e percentile des hauteurs de vagues déferlantes (Hb) sur la période 1990-2017. La densité des cyclones est indiquée par un ombrage gris. Crédits : S. Jullien et al.

Référence publication : S. Jullien et al., *Unveiling the global influence of tropical cyclones on extreme waves approaching coastal areas*, *Nature communications*, **15** (1) (2024), DOI : [10.1038/s41467-024-50929-2](https://doi.org/10.1038/s41467-024-50929-2).



- » **3 juin - 25 septembre 2024 :** Campagne Appel à Proposition de Recherche ([APR](#)) du CNES pour l'année 2025
- » **22 juin 2024 :** Succès du lancement de la mission sino française SVOM
- » **26 juin 2024 :** Succès du [vol transatlantique de BSO](#) opéré par le CNES
- » **26 juin 2024 :** Réunion du Comité des Programmes Scientifiques ([CPS](#)) du CNES
- » **27 juin 2024 :** Publication par l'ESA de la première image [EarthCARE](#)
- » **19-20 août 2024 :** Survol Lune/Terre par [JUICE](#)
- » **4 septembre 2024 :** Succès du lancement du satellite [Sentinel-2C](#) depuis le Centre Spatial Guyanais
- » **7 octobre 2024 :** Lancement prévu de la mission HERA
- » **8-10 octobre 2024 :** Séminaire de prospective Scientifique ([SPS](#)), Saint Malo, France
- » **14-18 octobre 2024 :** 75^e Congrès International d'Astronautique ([IAC](#)), Milan, Italie
- » **16-18 octobre 2024 :** Journées CNES des Jeunes Chercheurs ([JC2](#)), Cité de l'Espace, Toulouse, France
- » **19-21 novembre 2024 :** 2^e Workshop international « [High-Resolution Thermal Earth Observation](#) » Ahmedabad, Gujarat, Inde

↓ **PARTENAIRES**

LES RÉSULTATS SCIENTIFIQUES PRÉSENTÉS DANS CETTE NEWSLETTER ONT ÉTÉ OBTENUS EN COLLABORATION AVEC LES PARTENAIRES NATIONAUX SUIVANTS :

Observation de la Terre :

AgroParisTech, Avignon Université, Bordeaux Sciences Agro, CAPTE, CEA, CLS, CNRS, Collège de France, EMMAH, ENSG Géomatique, ENTROPIE, Ifremer, IGN, INRAE, Institut de Physique du Globe de Paris, IPSL, IRD, ISPA, IUEM, LEGOS, LOPS, LSCE, MARBEC, MIA-Paris-Saclay, OceanDataLab (ODL), Université de Bretagne Occidentale, Université de Bordeaux, Université de la Nouvelle-Calédonie, Université de la Réunion, Université de Montpellier, Université de Toulouse, Université Paris Cité, Université Paris-Saclay, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ).

Sciences de l'Univers :

Astroparticule et Cosmologie (APC), CEA, CNRS, Département des Systèmes Basses Températures (DSBT), Ecole Polytechnique, Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie, Institut Jean Le Rond d'Alembert, IRAP, Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales, LESIA, LPC2E, LPP, Muséum National d'Histoire Naturelle, Observatoire de Paris, Scalian, Sorbonne Université, Université de Paris, Université d'Orléans, Université Paris Cité, Université Paris-Saclay, Université Paris Sciences & Lettres (PSL), Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ).



Pour en savoir plus sur les projets du CNES, suivez [ce lien](#)