



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Rapport annuel – Annual report 2025
Institut de physique du globe de Paris



En couverture


In cover

Météorite primitive de type chondrite trouvée dans le désert de l'Atacama.

Primitive chondrite-type meteorite discovered in the Atacama Desert.

Sommaire

Contents

	Entretien avec Marc Chaussidon, directeur de l'IPGP et Olivier Peyret, président du CA Interview with Marc Chaussidon, Director of the IPGP and Olivier Peyret, Chairman of the Board of Directors	02		Observatoires Observatories	87
	En images In pictures	05		Focus : S-CAPAD/DANTE Focus : S-CAPAD/DANTE	128
	Focus : Édouard Kaminski Président de l'Université Paris Cité Focus : Édouard Kaminski – President of Université Paris Cité	14		Focus : Deux thèses Focus : Two theses Clément Sagazan Marine Gelin	140 140 143
	Nouveaux projets de recherche New research projects	16		Partenariats et relations internationales Partnerships and international relationships	147
	Focus : Chaire BioMetCrit Focus : BioMetCrit Chair	24		Focus : PARI : de nouveaux équipements au service de l'analyse de pointe PARI: new instruments advancing cutting-edge analysis and addressing environmental challenges	156
	Nouveaux instruments New instruments	29		Observatoires, thèmes, plateformes et équipes de recherche Observatories, themes, platforms and research teams	160
	Prix et distinctions Awards and honours	36		Direction, instances et référents Management, bodies and officers	164
	Nouveaux chercheurs et enseignants-chercheurs New researchers and professors	39		Budget	165
	Thèmes IPGP IPGP themes	45		Effectifs Staff	166
	Intérieurs de la Terre et des planètes Earth and Planetary Interiors	45			
	Risques naturels Natural Hazards	53			
	Systeme Terre Earth System Science	65			
	Origines Origins	77			
	Focus : Développement durable et responsabilité sociétale (DD&RSE) Sustainable development and corporate social responsibility (SD&CSR)	86			



Entretien avec Marc Chaussidon - Directeur de l'IPGP et Olivier Peyret - Président du Conseil d'Administration de l'IPGP

Interview with Marc Chaussidon, Director of the IPGP and Olivier Peyret, Chairman of the Board



Ce rapport annuel met en lumière la grande variété des thématiques couvertes à l'IPGP dans le domaine des sciences de la Terre, de l'environnement et des planètes, ainsi que le rôle très important dans ces thématiques de nos observatoires. 2025 a été riche en avancées scientifiques comme le montre la sélection de publications faite dans ce rapport par les quatre grands thèmes, et comme le montre avec plus de détails la rubrique des actualités scientifiques de notre site web. Beaucoup de ces travaux reposent sur l'obtention de financements très compétitifs, nationaux comme les projets ANR ou européens comme les projets ERC, et amènent une reconnaissance au niveau national et international de nos collègues comme en témoigne la rubrique prix et distinctions. Bravo à tous.

Ces avancées scientifiques sont rendues possibles par le développement de notre instrumentation géophysique et géochimique, deux exemples sont donnés dans ce rapport, et par le fonctionnement de nos deux plateformes PARI et S-CAPAD/DANTE. Le bilan présenté pour les quatre premières années après son évolution de la plateforme de calcul et de traitement de données de l'IPGP, S-CAPAD/DANTE, est éloquent. Ces avancées scientifiques peuvent aussi amener à des applications industrielles originales et avec un fort potentiel sociétal comme le montre la description des travaux réalisés dans le cadre de la chaire BioMetCrit.

This annual report highlights the wide range of topics covered at the IPGP in the fields of Earth, environmental and planetary sciences, as well as the vital role played by our observatories in these areas. 2025 was a year rich in scientific advances, as demonstrated by the selection of publications featured in this report by the four main themes, and as shown in greater detail in the scientific news section of our website. Much of this work relies on securing highly competitive funding, whether national (such as ANR projects) or European (such as ERC projects), and brings national and international recognition to our colleagues, as evidenced in the 'Awards and Distinctions' section. Well done to everyone.

These scientific advances are made possible by the development of our geophysical and geochemical instrumentation – two examples are given in this report – and by the operation of our two platforms, PARI and S-CAPAD/DANTE. The results presented for the first four years following the new step of the IPGP's data processing and calculation platform, S-CAPAD/DANTE, speak for themselves. These scientific advances may also lead to innovative industrial applications with significant societal potential, as demonstrated by the description of the work carried out under the BioMetCrit Chair.



La réalisation à l'automne 2025 du premier workshop entre l'Institut national de volcanologie et de géophysique italien (INGV) et l'IPGP marque une avancée très importante dans le renforcement des collaborations entre nos deux institutions encadrées par un accord cadre de 4 ans. L'INGV et l'IPGP sont évidemment très proches du fait de leurs missions nationales liées aux risques naturels telluriques mais partagent aussi beaucoup de thématiques scientifiques communes.

Hosting the first workshop between the Italian National Institute of Volcanology and Geophysics (INGV) and the IPGP in autumn 2025 marks a very significant step forward in strengthening collaboration between our two institutions under a four-year framework agreement. The INGV and the IPGP are naturally very closely aligned due to their national missions relating to natural geological hazards, but they also share many common scientific themes.

Le nombre de thèses ayant été soutenues en 2025 (26) et ayant commencé en 2025 (33) ainsi que l'origine des étudiants, 35 % d'étudiants étrangers, confirme à la fois la dynamique des thématiques de recherche de l'IPGP et de leur financement sur projet, ainsi que l'attractivité de l'IPGP. De plus, sur les 33 doctorants qui ont commencé leur thèse en 2025, 13 sont issus de la filière master de l'IPGP. Ceci démontre aussi la qualité de nos formations avec les efforts continus faits pour les améliorer et les rendre encore plus attractives, comme avec le changement en 2025 de la maquette du master.

The number of PhDs successfully defended in 2025 (26) and those started in 2025 (33), together with the origin of the students—35 % of whom were international students—confirms both the momentum of the IPGP's research themes and their project-based funding, as well as the IPGP's appeal. Furthermore, of the 33 PhD students who began their theses in 2025, 13 came from the IPGP's Master's programme. This also demonstrates the quality of our curriculae, alongside the ongoing efforts made to improve them and make them even more appealing, such as the overhaul of the Master's programme in 2025.



Équipe de direction 2025 (de gauche à droite et de haut en bas) : Anne Le Friant, Marc Chaussidon, Marc Benedetti, Gauthier Hulot, Antoine Charlot, Arnaud Lemarchand et Marianne Greff.

2025 Management Team (from left to right and top to bottom): Anne Le Friant, Marc Chaussidon, Marc Benedetti, Gauthier Hulot, Antoine Charlot, Arnaud Lemarchand and Marianne Greff.



Deux faits institutionnels marquants se sont déroulés en 2025. Notre conseil d'administration de décembre a voté à l'unanimité pour donner mandat au président d'Université Paris Cité, Édouard Kaminski, pour lancer la procédure de sortie d'UPCité du statut d'établissement public expérimental. Déjà en 2018 notre conseil avait voté à l'unanimité pour s'engager dans la création d'UPCité avec l'évolution des statuts de l'IPGP vers ceux d'un établissement composante d'UPCité. Le vote de décembre 2025 montre la réussite d'UPCité et de l'intégration de l'IPGP. En décembre, notre conseil d'administration a aussi choisi Jean-Philippe Avouac et son projet pour la future direction de l'IPGP à compter du 25 mars 2026.

Ce rapport annuel est le dernier que nous présentons après 10 ans de direction de l'IPGP et 9 ans de présidence du conseil d'administration. Ces années ont été intenses et nous tenons à remercier tous les personnels et étudiants qui par leur investissement ont fait que l'IPGP est ce qu'il est et qui portent sa réputation partout dans le monde. Une mention toute spéciale de ces remerciements est pour Antoine Charlot qui quitte aussi ses fonctions de directeur général des services après 8 ans d'activités encore plus intenses. Tous nos vœux de réussite accompagnent Jean-Philippe Avouac et son équipe pour la mandature à venir.

Two significant institutional developments took place in 2025. At our December board meeting, we voted unanimously to mandate the President of Université Paris Cité, Édouard Kaminski, to initiate the process of making UPCité bylaws permanent. Back in 2018, our board voted unanimously to commit to the creation of UPCité, with the IPGP's bylaws being amended to make it a constituent institution of UPCité. The vote in December 2025 demonstrates the success of UPCité and the integration of the IPGP. In December, our board also selected Jean-Philippe Avouac and his project for the future directorship of the IPGP, effective from 25 March 2026.

This annual report is the last one we are presenting after 10 years as director of the IPGP and 9 years as Chair of the Board. These have been intense years, and we would like to thank all the staff and students whose dedication has made the IPGP what it is today and who uphold its reputation around the world. A special mention of thanks goes to Antoine Charlot, who is also stepping down from his role as Director-General of Services after eight years of even more intense work. We wish Jean-Philippe Avouac and his team every success for the coming term of office.

En images In pictures



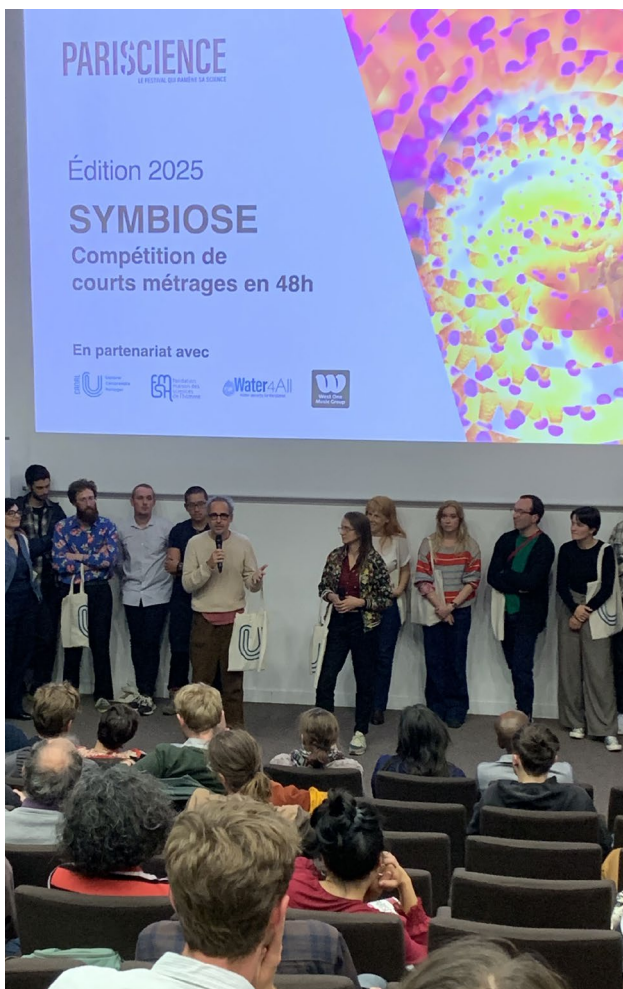
Workshop sur les récents développements en biohydrométallurgie pour la récupération durable des métaux critiques, organisé à L'Institut de physique du globe de Paris (IPGP). Cette journée a rassemblé chercheurs et experts autour des dernières avancées scientifiques et des solutions innovantes pour une extraction plus durable des ressources.

Workshop on recent developments in biohydrometallurgy for the sustainable recovery of critical metals, held at the Institut de physique du globe de Paris. The event brought together researchers and experts to discuss the latest scientific advances and innovative solutions for more sustainable resource extraction.



Tournage du documentaire consacré à Pierre et Marie Curie dans les locaux de l'IPGP diffusé le 9 novembre 2025 dans l'émission "13h15 le dimanche". L'IPGP a accueilli l'équipe de France Télévisions pour le tournage d'images dans la reconstitution historique du laboratoire de Pierre et Marie Curie au sein du Pavillon Curie, lieu emblématique et historique de leurs découvertes.

Filming of a documentary on Pierre and Marie Curie took place at the IPGP and was broadcast on 9 November 2025 as part of the programme "13h15 le dimanche". The IPGP welcomed the France Télévisions crew to film footage in the historical reconstruction of Pierre and Marie Curie's laboratory within the Curie Pavilion, the iconic and historic site of their discoveries.



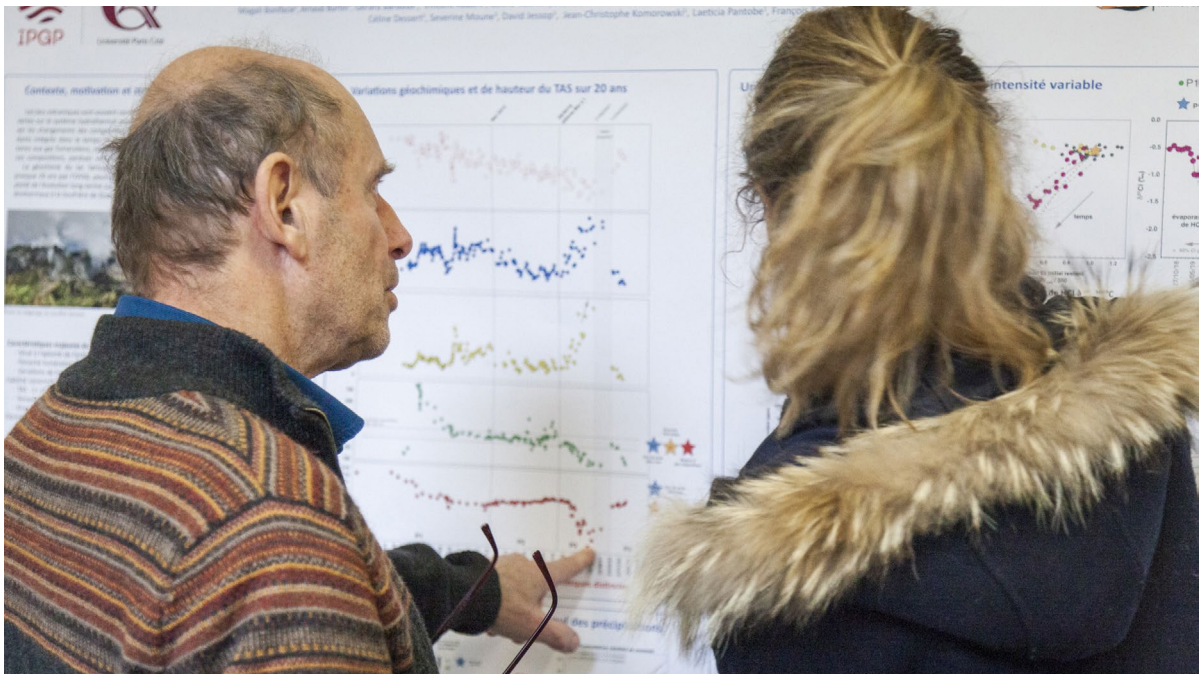
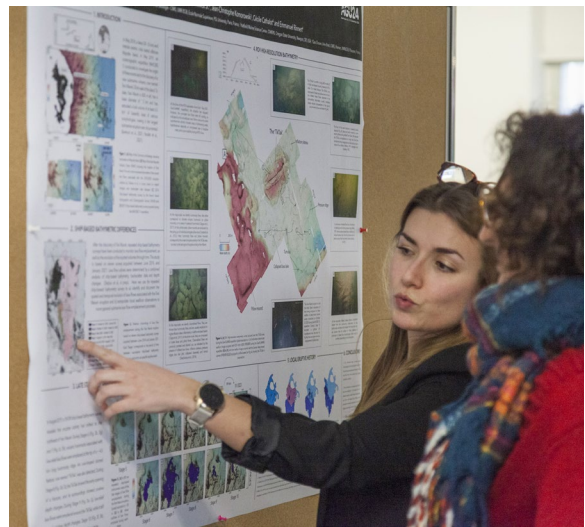
Parisience 2025. Du 23 au 27 octobre 2025, l'IPGP a ouvert ses portes aux groupes scolaires et au grand public passionnés de cinéma scientifique. Une nouvelle édition couronnée de succès grâce à l'implication de l'ensemble des équipes et à la participation de Fidel Costa pour la compétition de courts métrages SYMBIOSE.

Parisience 2025. From 23 to 27 October 2025, the IPGP opened its doors to school groups and the general public with a passion for science films. This year's event was a resounding success thanks to the dedication of all the teams involved and the participation of Fidel Costa in the SYMBIOSE short film competition.



Journée du thème "Risques naturels" 2025 à l'IPGP. Cette journée est dédiée à la science et à des moments conviviaux autour du thème des risques naturels. Une journée rythmée par des présentations orales le matin et des discussions autour de posters scientifiques.

"Natural Hazards" Theme Day 2025 at the IPGP. This event is dedicated to science and socialising around the theme of natural hazards. The day will feature oral presentations in the morning and discussions around scientific posters.





Signature par Marc Chaussidon d'un accord de coopération avec Universiti Teknologi MARA (UiTM).
Marc Chaussidon signs a cooperation agreement with Universiti Teknologi MARA (UiTM).



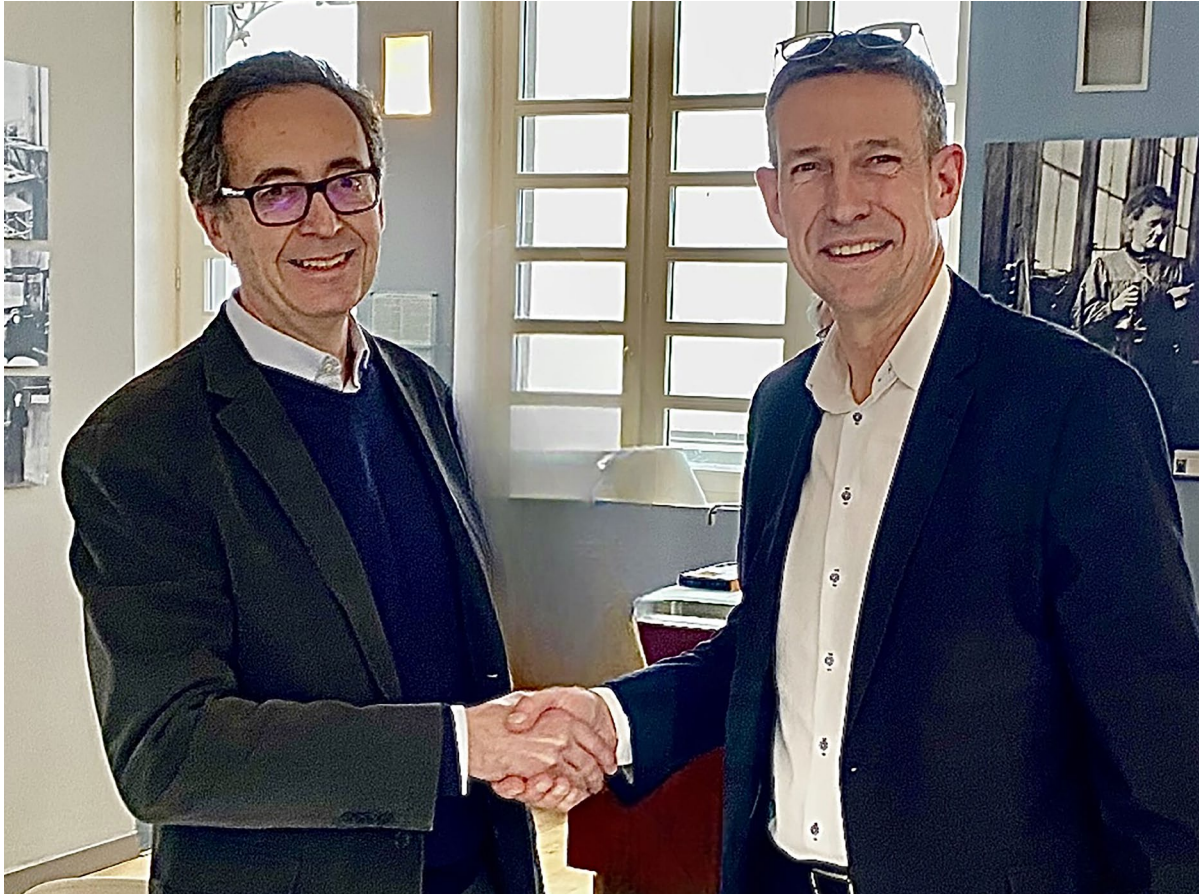
Conférence « Dialogues scientifiques sur les transitions », organisée dans le cadre de la Semaine de la santé planétaire à l'Université Paris Cité. Cet événement réunit chercheurs et chercheuses autour des enjeux contemporains liés aux transformations écologiques, sociales et sanitaires.

Conference "Dialogues scientifiques sur les transitions", held as part of the Semaine de la Santé Planétaire at Université Paris Cité. The event brings together researchers to discuss current ecological, social and health transitions."



Frédéric Moynier, chercheur en Cosmochimie, reçoit la médaille de l'engagement de l'Université Paris Cité à l'occasion de la première Semaine de la santé planétaire le 16 septembre 2025.

Frédéric Moynier, a researcher in cosmochemistry, received the University of Paris Cité's Medal for Commitment during the first Global Health Week on 16 September 2025.

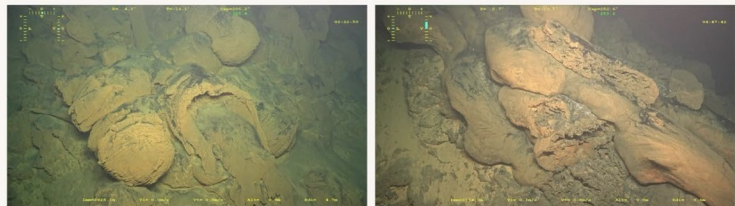


L'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) et la société Terrensis ont officialisé le 4 mars 2025 un partenariat stratégique visant à approfondir la recherche sur l'hydrogène naturel. La signature de cette convention s'est tenue dans les locaux de l'IPGP, en présence de Marc Chaussidon, Directeur de l'IPGP, et Vincent Bordmann, CEO de Terrensis.

On 4 March 2025, the Institut de physique du globe de Paris (IPGP) and Terrensis formalised a strategic partnership aimed at advancing research into natural hydrogen. The signing ceremony took place at the IPGP's premises, attended by Marc Chaussidon, Director of the IPGP, and Vincent Bordmann, CEO of Terrensis.



Volcanisme sous-marin : le cas de Mayotte



Bulbous and drained pillows

Elongated pillows

Crédits : Mission océanographique GeoFLAMME - 2021

Lancement de la chaîne Twitch de l'IPGP en 2025. Depuis le lancement de la chaîne en juin dernier, l'IPGP a diffusé quatre live Twitch en présence de chercheurs, doctorants et passionnés de science autour de thématique propre à l'Institut.

Launch of the Twitch channel of Institut de physique du globe de Paris in 2025. Since the channel was launched last June, the IPGP has broadcast four live Twitch sessions featuring researchers, PhD students and science enthusiasts discussing topics related to the Institute's fields of expertise.



Entretien avec Édouard Kaminski, Président de l'Université Paris Cité

Interview with Édouard Kaminski,
President of Université Paris Cité

L'année 2025 a été placée sous le signe de la célébration de l'anniversaire des cinq ans de l'Université Paris Cité (UPCité). Issue de la fusion de Paris Descartes et Paris Diderot, et intégrant l'IPGP comme établissement-composante conservant sa personnalité morale et juridique, UPCité se donnait comme objectif de devenir une des toutes meilleures universités de recherche en France. Seule université couvrant toutes les disciplines à Paris, l'université a été définitivement labellisée Initiative d'Excellence (IdEx) en 2022, et a régulièrement progressé au sein des classements internationaux, pour apparaître aujourd'hui 60^e au classement de Shanghai et 37^e au classement de Leiden (classement mesurant l'impact des publications).

L'IPGP a pris toute sa part dans la construction de la trajectoire d'UPCité, permettant notamment à l'université d'apparaître régulièrement autour de la 15^e place mondiale en sciences de la Terre au classement thématique de Shanghai. Plus fondamentalement, l'IPGP apporte une contribution unique à la signature de l'université, la « santé planétaire : des êtres humains en bonne santé, au sein de sociétés en bonne santé, sur une planète en bonne santé ». Cette signature s'appuie en effet sur l'excellence de la recherche à l'IPGP dans les thématiques fondamentales des géosciences, sur la singularité et la visibilité des observatoires, et sur l'ouverture interdisciplinaire – par exemple au sein du Centre des Politiques de la Terre. Ces atouts nourrissent en retour l'attractivité de nos formations, de la licence jusqu'au doctorat, formations qui au-delà de l'excellence de nos recherches reposent sur l'ouverture vers le monde de l'entreprise pour nos parcours en alternance, et mise sur l'interdisciplinarité, par exemple dans les CPES avec Janson de Sailly ou dans les bi-diplômes avec Sciences Po.

The year 2025 was marked by the celebrations of the fifth anniversary of Université Paris Cité (UPCité). Formed from the merger of Paris Descartes and Paris Diderot, and integrating the IPGP as a constituent institution retaining its own legal personality, UPCité set itself the goal of becoming one of the very best research universities in France. As the only university in Paris covering all disciplines, the university was officially awarded the Initiative of Excellence (IdEx) label in 2022 and has steadily climbed the international rankings, currently standing at 60th in the Shanghai Ranking and 37th in the Leiden Ranking (a ranking that measures the impact of publications).

The IPGP has played a key role in shaping UPCité's trajectory, notably enabling the university to consistently rank around 15th in the world for Earth Sciences in the Shanghai subject rankings. More fundamentally, the IPGP makes a unique contribution to the university's mission statement: 'planetary health: healthy people, in healthy societies, on a healthy planet'. This distinction is based on the excellence of research at the IPGP in fundamental areas of geosciences, on the unique nature and high profile of its observatories, and on its interdisciplinary approach – for example, within the Centre for Earth Policy. These strengths, in turn, enhance the appeal of our degree programmes, from bachelor's to doctoral level; programmes which, beyond the excellence of our research, are underpinned by our openness to the business world through our work-study schemes, and a focus on interdisciplinarity, for example in the preparatory classes (CPES) with Janson de Sailly or in the dual-degree programmes with Sciences Po.



En cinq ans l'IPGP est ainsi devenu emblématique de la vision que porte l'Université Paris Cité, celle d'une université d'excellence à impact positif sur la société. Le présent rapport montre que l'année 2025 ne fait pas exception à cette dynamique, marquée notamment par le lancement de trois nouvelles ERC et de la chaire BioMetCrit sur la valorisation des déchets sources de métaux critiques, illustrée par la diversité des publications, depuis la nouvelle méthode Jerk pour l'alerte volcanique précoce jusqu'au développement de nouvelles méthodes pour l'astrobiologie, et soulignée par un grand nombre de prix et de distinctions.

Tous les résultats et les avancées présentés dans le rapport d'activité reflètent la valeur intrinsèque du collectif qui forme l'IPGP d'aujourd'hui. Mais ils doivent également beaucoup à l'engagement de l'équipe de direction sortante, au premier chef Marc Chaussidon et Antoine Charlot, et à l'accompagnement dévoué et exigeant du président du conseil d'administration, Olivier Peyret. Qu'il me soit permis ici de saluer personnellement leur action pour l'IPGP et les contributions essentielles qu'ils ont apportées également à l'Université Paris Cité depuis sa création. Je formule tous mes vœux de réussite pour leurs successeurs qui sauront mener l'IPGP toujours plus loin sur les routes du succès.

Over the past five years, the IPGP has thus come to embody the vision of Université Paris Cité: that of a university of excellence with a positive impact on society. This report shows that 2025 is no exception to this trend, marked in particular by the launch of three new ERCs and the BioMetCrit Chair on the recovery of critical metals from waste, as evidenced by the diversity of publications, ranging from the new Jerk method for early volcanic warning to the development of new methods for astrobiology, and highlighted by a large number of prizes and awards.

All the results and achievements presented in the annual report reflect the intrinsic value of the collective that makes up today's IPGP. However, they also owe a great deal to the commitment of the outgoing management team, led by Marc Chaussidon and Antoine Charlot, and to the dedicated and demanding support of the Chairman of the Board, Olivier Peyret. I would like to take this opportunity to pay personal tribute to their work for the IPGP and the vital contributions they have also made to the Université Paris Cité since its inception. I wish their successors every success as they lead the IPGP ever further along the path to success.



Nouveaux projets de recherche

New research projects



Projets européens
EU projects

LISTEN FLASH



LISTEN FLASH complètera les mesures des sismomètres déployés sur la Lune par les missions Chang'E-7, Artemis (avec LEMS et SPSS) puis CLPS, avec FSS, entre 2026 et 2030, par des observations de Flashes Lunaires depuis trois télescopes infra-rouges installés à Calern, France, à l'Observatoire de Table Mountain, USA et en Australie. Ce réseau permettra de localiser et de dater les impacts, permettant ainsi la mesure précise des vitesses de propagation des ondes sismiques puis leur inversion en termes d'épaisseur crustale et de température du manteau supérieur de la Lune. Le premier télescope à Calern est déjà opérationnel, avec plusieurs flashes détectés en décembre 2025 lors du passage de la Lune dans les Geminides. © Pierre-Yves FROISSART, IPGP.

LISTEN FLASH will complement the measurements from seismometers deployed on the Moon by the Chang'E-7, Artemis missions (with LEMS and SPSS), and later CLPS (with FSS), between 2026 and 2030. It will do so through observations of lunar impact flashes using three infrared telescopes installed at Calern (France), the Table Mountain Observatory (USA), and in Australia. This network will enable the localization and precise dating of impacts, thereby allowing accurate measurements of seismic wave propagation velocities and their subsequent inversion to constrain the lunar crustal thickness and the temperature of the Moon's upper mantle. The first telescope, located at Calern, is already operational, with several flashes detected in December 2025 during the Moon's passage through the Geminids meteor shower. © Pierre-Yves FROISSART, IPGP.

Explorer la Lune par la sismologie et les impacts de météorites

Philippe Lognonné, Professeur à l'Université Paris Cité, avec le projet « LISTEN FLASH », en collaboration avec Marco Delbo (Laboratoire Lagrange, CNRS, OCA) et une équipe internationale (FR, USA, CN, JP, UK, CH, AU), se tourne vers la Lune, après Mars et la mission InSight.

L'objectif est de détecter avec au moins 3 télescopes mondialement distribués les flashes lumineux créés par les impacts de météorites sur la face visible.

Ces observations seront couplées aux sismomètres bientôt déployés sur la Lune, dont ceux des missions américaines Farside Seismic Suite et Artemis-3 ou de la mission chinoise Chang'E-7. Cette approche multi-messager décryptera les processus impacts et la structure crustale de la Lune, avec des nouvelles perspectives sur notre satellite naturel.

Projet LISTEN FLASH porté par Philippe Lognonné, équipe Planétologie et sciences spatiales

Exploring the Moon through seismology and meteorite impacts

Philippe Lognonné, professor at Université Paris Cité, is leading the project LISTEN FLASH, in collaboration with Marco Delbo (Lagrange laboratory, CNRS, OCA) and an international team (France, USA, China, Japan, UK, Switzerland, Australia). After his work on Mars and the InSight mission, he now turns to the Moon.

The project's goal is to detect the light flashes produced by meteorite impacts on the Moon's near side, using at least three telescopes deployed around the globe.

These optical observations will be coupled with data from seismometers soon to be deployed on the Moon, including those from NASA's Farside Seismic Suite and Artemis-3 missions, as well as China's Chang'e-7 mission. This multi-messenger approach will shed new light on impact processes and the Moon's crustal structure, opening up fresh perspectives on our natural satellite.

LISTEN FLASH project, led by Philippe Lognonné, Planetary and Space Sciences Team



DAWN



Reconstituer l'atmosphère primitive de la Terre

Razvan Caracas, Directeur de recherche CNRS, avec son projet « DAWN », en collaboration avec M. Turbet et F. Forget du Laboratoire de Météorologie Dynamique (Sorbonne Université) et L. Schaeffer de l'Université Stanford, explore l'atmosphère primitive de la Terre pendant l'Hadéen, les premiers 500 millions d'années de la Terre, qui représente la première période géologique terrestre. En combinant des simulations atomistiques avec de l'intelligence artificielle, son équipe reconstitue les interactions entre le magma, l'atmosphère et l'espace interplanétaire. Ces travaux pourraient fournir des indices cruciaux sur le début de l'atmosphère terrestre, offrant ainsi une vision plus claire des conditions qui ont permis l'émergence de la vie sur notre planète.

Projet DAWN porté par Razvan Caracas, équipe Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale (CAGE)

Reconstructing Earth's primitive atmosphere

Razvan Caracas, CNRS senior researcher, is leading the DAWN project in collaboration with M. Turbet and F. Forget from the dynamic meteorology laboratory (Sorbonne Université) and L. Schaeffer from Stanford University. The project focuses on the Hadean era – the first 500 million years of Earth's history.

By combining atomic-scale simulations with artificial intelligence, the team aims to reconstruct interactions between magma, the atmosphere, and interplanetary space. This research may provide crucial insights into the formation of Earth's early atmosphere and the conditions that enabled life to emerge on our planet.

DAWN project led by Razvan Caracas, Cosmo-chemistry, Astrophysics and Experimental Geophysics (CAGE) Team



Le projet ERC DAWN vise à reconstruire la formation et l'évolution de l'atmosphère terrestre durant l'Hadéen, les 500 premiers millions d'années de l'histoire de la Terre. En combinant simulations atomistiques ab initio, potentiels interatomiques issus du machine learning, et modèles thermochimiques et climatiques globaux, ce projet quantifie les flux de volatils entre intérieur et surface, ainsi que leur dégazage, leur recyclage et leur perte vers l'espace. Cette approche intégrée permettra d'établir un scénario cohérent de l'évolution atmosphérique primitive et de mieux comprendre les conditions qui ont conduit à l'émergence des premières enveloppes habitables.

The ERC project DAWN aims to reconstruct the formation and evolution of Earth's atmosphere during the Hadean, the first 500 million years of our planet's history. By combining state-of-the-art ab initio atomistic simulations, machine-learning-based interatomic potentials, and global thermochemical and climate models, the project quantifies volatile fluxes between Earth's interior and surface, including degassing, recycling, and loss to space. This integrated framework will establish a consistent evolutionary pathway for the early atmosphere and constrain the conditions that led to the emergence of habitable environments.



DUST



European Research Council
Established by the European Commission

Découvrir l'origine des premiers solides du système solaire

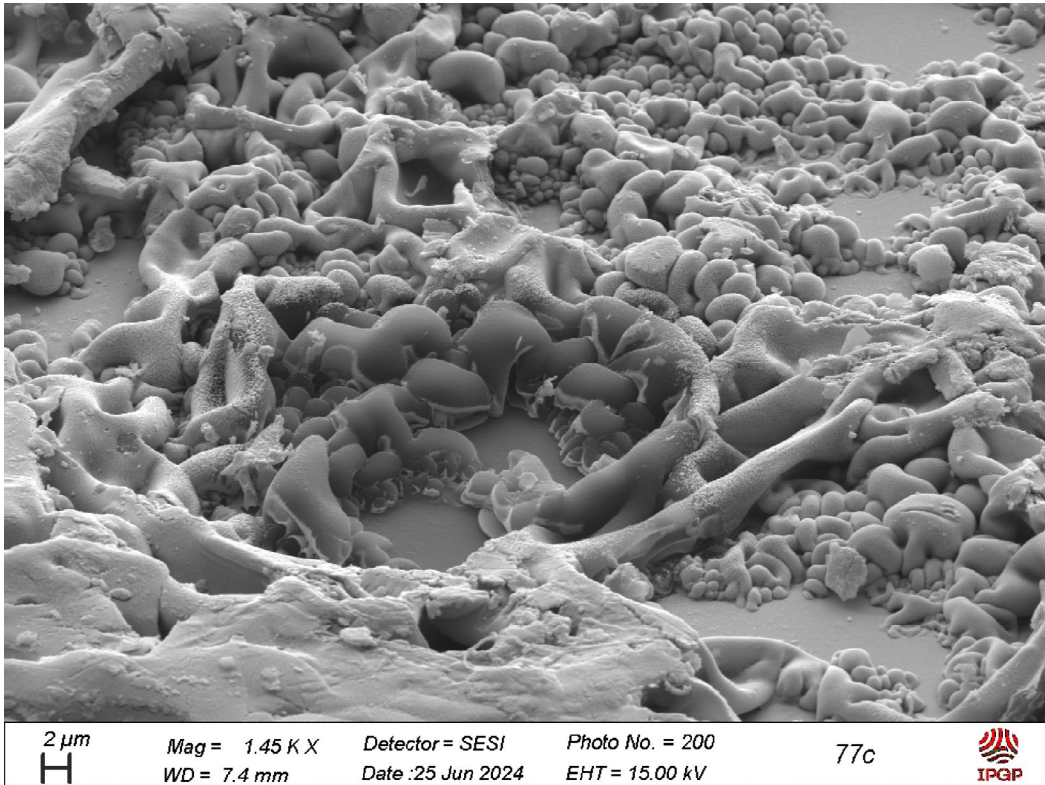
Marc Chaussidon, Directeur de l'IPGP, Directeur de recherche CNRS, cherche à reconstituer dans le projet « DUST » les processus physiques et chimiques qui ont produit les premiers solides de la nébuleuse protosolaire. Grâce à des expériences en plasma et à des techniques d'analyse innovantes, son équipe étudie les réactions responsables de fractionnements isotopiques indépendants de la masse de l'oxygène tels que ceux connus dans les météorites. Ces fractionnements isotopiques sont le fil rouge qui permettra de reconstituer la chaîne de réactions pour passer du gaz nébulaire aux grains qui ont servi à former les premières planètes de notre système solaire.

Projet DUST porté par Marc Chaussidon, Directeur de recherche CNRS

Uncovering the origin of the first solids in the solar system

Marc Chaussidon, director of the IPGP and CNRS senior researcher, is leading the DUST project to investigate the physical and chemical processes that produced the first solids in the protosolar nebula. Through plasma experiments and cutting-edge analytical techniques, his team studies the reactions behind oxygen isotope fractionations that are independent of mass – features commonly observed in meteorites. These isotopic signatures serve as a thread that may help reconstruct the chain of reactions leading from nebular gas to the dust grains that eventually formed the first planets in our solar system.

DUST project led by Marc Chaussidon, CNRS Research Director



Exemple de dépôts de matière organique obtenus lors d'expérience de condensation dans un plasma produit dans un mélange gazeux CH₄+H₂O+Ar. La zone centrale plus sombre correspond à une analyse de la composition des trois isotopes de l'oxygène par sonde ionique. © Nathan Asset, IPGP.

Example of organic matter deposits obtained during a condensation experiment in a plasma generated from a gas mixture of CH₄+H₂O+Ar. The darker central area corresponds to an analysis of the composition of the three oxygen isotopes using an ion probe. © Nathan Asset, IPGP.



HARMONIE

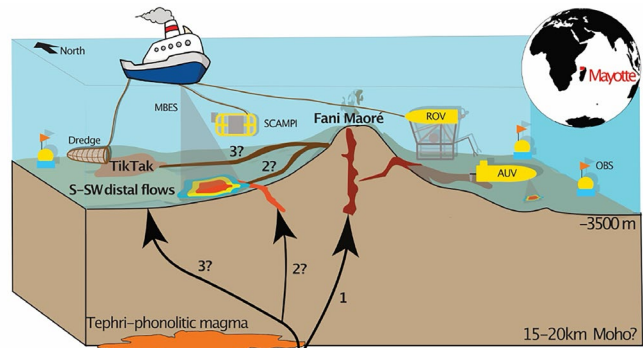


Schéma descriptif du projet. Descriptive diagram of the project.

Enregistrement de signaux hydro-acoustiques et observations multidisciplinaires liés par intégration numérique pour le suivi d'éruptions volcaniques

HARMONIE vise à améliorer la compréhension de l'éruption sous-marine du volcan Fani Maoré entre 2018 et 2021, situé à proximité de Mayotte, dans le canal du Mozambique. Les éruptions sous-marines posent des défis importants en raison de l'accès limité aux sites d'éruption et au manque de données en haute résolution. L'éruption de Fani Maoré offre une opportunité unique d'étudier l'évolution d'un système volcanique sous-marin grâce aux 30 campagnes en mer qui ont été organisées jusqu'à présent. En combinant des données multidisciplinaires, sismicité, hydro-acoustique, pétrologie, vidéos et bathymétrie, le projet va explorer des processus clés tels que la propagation du magma et la dynamique des coulées de lave.

Les objectifs scientifiques du projet HARMONIE incluent l'étude de questions majeures :

(Q1) Les données hydro-acoustiques peuvent-elles compléter la surveillance sismique pour suivre les coulées de lave et les flux éruptifs ?

(Q2) Comment les différentes phases de l'éruption de Fani Maoré se sont-elles déroulées et quels étaient les chemins du magma ?

(Q3) Les signaux hydro-acoustiques et la sismicité, complétés par des données in situ limitées, peuvent-ils suivre l'évolution morphologique des édifices volcaniques ?

Le projet est organisé en trois étapes : l'analyse des données continues des OBS (WP1), la détermination de la dynamique de l'éruption et les changements morphologiques des coulées (WP2), et le développement de modèles de prévision pour l'activité éruptive (WP3).

Finalement, HARMONIE améliorera la surveillance en temps réel des éruptions volcaniques sous-marines, offrant des perspectives non seulement pour Fani Maoré mais aussi pour d'autres volcans sous-marins à travers le monde.

Projet HARMONIE porté par Lise Retailleau,
équipe Sismologie

Hydro-acoustic recording and multidisciplinary observations linked by numeric integration for eruption monitoring

HARMONIE aims to enhance our understanding of the 2018-2021 Fani Maoré submarine volcanic eruption near Mayotte, Mozambique Channel. Submarine eruptions pose significant challenges due to limited access to eruption sites and high-resolution data. The Fani Maoré eruption provides a unique opportunity to investigate the evolution of a large-scale submarine system thanks to the 30 oceanographic campaigns that have been organized since 2019 leading to an extensive dataset. By integrating multidisciplinary data, including seismicity, hydro-acoustics, petrology, videos, and bathymetry, we seek to uncover critical processes such as magma propagation, lava flow dynamics, and fissure formation.

HARMONIE's scientific objectives include addressing key questions:

(Q1) Can hydro-acoustic data complement seismic monitoring to track lava flows and eruption fluxes?

(Q2) How did the various phases of the Fani Maoré eruption unfold, and what were the magma pathways?

(Q3) Can hydro-acoustic signals and seismicity, supplemented by scarce in situ data, track the morphological evolution of the volcanic edifices?

The project is organized into three work packages, focusing on the analysis of continuous OBS data (WP1), the relationship between eruption dynamics and morphological changes (WP2), and the development of forecasting models for future eruption activity (WP3).

Ultimately, HARMONIE will improve real-time monitoring and eruption prediction for underwater volcanic systems, providing insights not only for Fani Maoré but for other submarine volcanoes worldwide.

HARMONIE project led by Lise Retailleau
Seismology Team



ME-THIOL

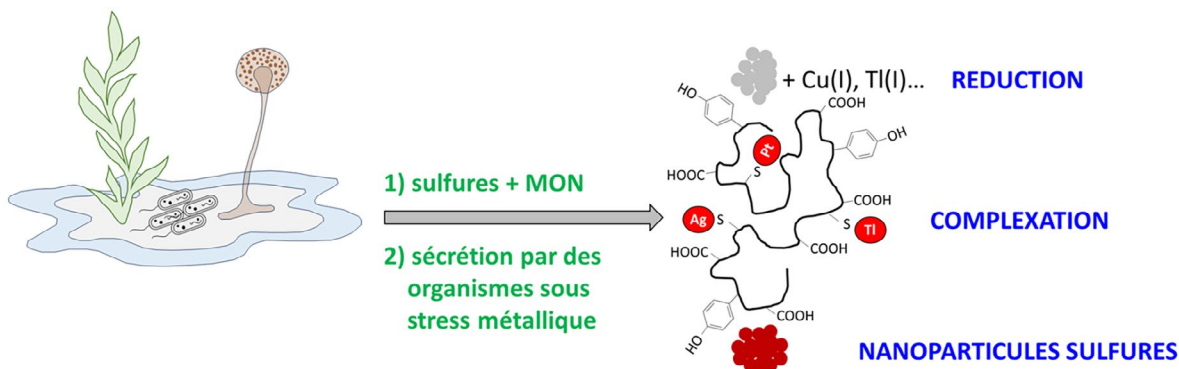


Schéma descriptif du projet.
Descriptive diagram of the project.

Modélisation des interactions métaux-thiols dans l'environnement

Le projet Me-Thiol vise à mieux comprendre le rôle des groupements thiolés (-SH) de la matière organique dans la spéciation et le devenir des métaux toxiques (Hg, Ag, Cd, Pt, Pd). Longtemps négligés dans les modèles géochimiques et écotoxicologiques, ces groupements sont désormais reconnus comme présents à des concentrations suffisantes pour contrôler la chimie des métaux dans de nombreux milieux naturels. Leur réactivité particulière, leur sensibilité aux conditions redox et leur production continue suggèrent l'existence d'un cycle dynamique (cryptique) encore mal compris.

Le projet s'attaque à plusieurs verrous : le manque de matrices représentatives riches en -SH, la difficulté de distinguer les différents sites de complexation, la prise en compte des changements redox, et le rôle des thiols dans la formation de nanoparticules de sulfures. Pour y répondre, des composés thiolés biologiques et naturels seront produits et étudiés afin de décrypter les mécanismes de complexation, de réduction et de précipitation avec différents métaux.

Ces données permettront de développer un modèle prédictif intégrant explicitement les interactions métaux-thiols, accompagné d'une base de données ouverte. Ce modèle, intégré dans un code de spéciation accessible, contribuera à des applications en évaluation des risques, remédiation environnementale, écotoxicologie et également potentiellement en santé.

Projet ME-THIOL porté par Charlotte Catrouillet, équipe Biogéochimie à l'Anthropocène des éléments et contaminants émergents (ACE)

Modelling metal-thiol interactions in the environment

The Me-Thiol project aims to better understand the role of thiol groups (-SH) in organic matter in the speciation and fate of toxic metals (Hg, Ag, Cd, Pt, Pd). Long neglected in geochemical and ecotoxicological models, these groups are now recognized as being present in concentrations sufficient to control metal geochemistry in many natural environments. Their unique reactivity, sensitivity to redox conditions, and continuous production suggest the existence of a dynamic (cryptic) cycle that is still poorly understood.

The project addresses several challenges: the lack of representative matrices rich in -SH groups, the difficulty in distinguishing between different complexation sites, the need to account for redox changes, and the role of thiols in the formation of sulfide nanoparticles. To address these challenges, biological and natural thiol compounds will be synthesized or collected and studied to decipher the mechanisms of complexation, reduction, and precipitation with various metals.

These data will enable the development of a predictive model explicitly incorporating metal-thiol interactions, accompanied by an open-access database. This model, integrated into an accessible speciation code, will contribute to applications in risk assessment, environmental remediation, ecotoxicology, and potentially in health as well.

ME-THIOL project led by Charlotte Catrouillet Biogeochemistry at the Anthropocene of Elements and Emerging Contaminants Team



Remédiation des sols contaminés par des métaux : une méthodologie pour faire progresser la phytoextraction

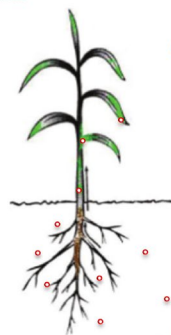
Le projet ANR REMAPE, piloté par Géosciences Rennes en collaboration avec ECOBIO et l'IPGP, adopte une approche innovante pour étudier la contamination des sols par les métaux toxiques. Il combine biogéochimie, écotoxicologie, modélisation et spectroscopies avancées, tout en intégrant les enjeux sociétaux liés à la gestion des sols pollués et à la phytoremédiation. Contrairement aux méthodes descriptives classiques, REMAPE se concentre sur une approche mécanistique : il quantifie les processus de transfert et de transformation des contaminants dans la rhizosphère, en conditions réelles et dynamiques. Face à la contamination croissante des sols, les techniques traditionnelles de dépollution, coûteuses et destructrices, cèdent la place à des alternatives écologiques comme la phytoextraction, mais son efficacité reste limitée par une méconnaissance de la biodisponibilité des contaminants. REMAPE vise à développer une méthodologie pour optimiser la phytodisponibilité des métaux, en analysant l'influence des propriétés du sol, des plantes, de la composition géochimique de la solution du sol et des réponses végétales.

Le projet aborde des défis clés, comme le suivi de la dynamique temporelle de libération des métaux, leur spéciation chimique, et le rôle des plantes dans leur biodisponibilité. L'objectif est de rendre la phytoextraction plus efficace et durable, pour une remédiation écologique des sols contaminés.

Projet REMAPE mené en partenariat avec Rémi Marsac (ACE)

Défis scientifiques pour élucider la phytodisponibilité des contaminants

- 1 – Suivre la solubilisation des Cts
Distribution des Cts
Spéciation des Cts
- 2 – Spéciation des Cts dans la solution du sol
Phase vraiment 'dissoute'
Phase colloïdale
- 3 – Effets des plantes
Stratégie nutritionnelle
Développement racinaire
Exsudats rhizosphériques



- A – Absorption des Cts**
[Cts]
Croissance et biomasse
Carence / Stress
Analyses moléculaires
- B – Solution du sol**
[Cts]
Spéciation des Cts
Exsudats
- Cts : Contaminants

Potentiel de mobilisation

Biodisponibilité des Cts

Réponse du sol et de la plante

Remediation of Metal-Contaminated Soils: A Methodology to Advance Phytoextraction

The ANR REMAPE project, led by Géosciences Rennes in collaboration with ECOBIO and IPGP, adopts an innovative approach to investigate soil contamination by toxic metals. It combines biogeochemistry, ecotoxicology, modeling, and advanced spectroscopic techniques, while integrating societal challenges related to the management of contaminated soils and phytoremediation.

In contrast to traditional descriptive methods, REMAPE focuses on a mechanistic approach: it quantifies the processes governing the transfer and transformation of contaminants in the rhizosphere under real and dynamic conditions. As soil contamination continues to increase, conventional remediation techniques—often costly and destructive—are being replaced by more ecological alternatives such as phytoextraction. However, their efficiency remains limited by an incomplete understanding of contaminant bioavailability. REMAPE aims to develop a methodology to optimize the phytobioavailability of metals by analyzing the influence of soil properties, plant characteristics, the geochemical composition of soil solutions, and plant responses.

The project addresses key challenges such as monitoring the temporal dynamics of metal release, their chemical speciation, and the role of plants in controlling their bioavailability.

Ultimately, the goal is to enhance the efficiency and sustainability of phytoextraction for the ecological remediation of contaminated soils.

REMAPE project, carried out in partnership with Rémi Marsac (ACE)

Caractères innovants :

- 1 – Intégrer la dynamique temporelle des contaminants pendant la culture
- 2 – Améliorer la prédiction de l'absorption par les plantes en intégrant la phase colloïdale et nanoparticulaire
- 3 – Évaluer le rôle des plantes, de la rhizosphère et des amendements (phases organiques, nanoparticulaires...) dans la dynamique de la spéciation des contaminants



Sources et puits des émissions de CO₂ dans les sols volcaniques

Bien que les émissions de CO₂ d'origine volcanique subaérienne ne représentent qu'une faible part du bilan carbone mondial actuel et ne soient pas les principaux facteurs du réchauffement climatique, elles contribuent à la concentration de fond de CO₂ dans l'atmosphère à long terme. La fraction significative provenant du dégazage diffus des sols à basse température, d'origine mixte magmatique et biogénique, est la cible principale du projet SOSIE et peut compenser les émissions de CO₂ liées aux phénomènes éruptifs ou persistants à haute température. Ce projet se concentre sur les émissions de CO₂ des sols de grands volcans, actifs ou quiescents (La Réunion, Mayotte, Comores), situés dans l'océan Indien. Le projet SOSIE intègre une approche multidisciplinaire comprenant des réseaux de surveillance au sol, des instruments portables multi-éléments, des analyses élémentaires et isotopiques précises des fluides et des minéraux, la pédologie et l'écologie microbienne.

Sources and sinks of CO₂ emissions in volcanic soils

While subaerial volcanic CO₂ emissions represent a small part of the modern global carbon budget and are not the primary drivers of global warming, they contribute to the long-term background concentration of CO₂ in the atmosphere. The significant fraction that resides in low temperature diffuse soil degassing, with a mixed magmatic and biogenic origin, is the main target of SOSIE project, and can overcome the CO₂ emitted by high temperature persistent or eruptive focused emissions. In this project we focus on soil CO₂ emissions on large, active or quiescent, volcanoes (La Réunion, Mayotte, Comoros) located in the Indian ocean. The SOSIE project integrates a multidisciplinary approach including ground-based monitoring networks, multi-elemental portable instruments, accurate elemental and isotopic analyses of fluids and minerals, soil science and microbial ecology.

SOSIE project led by Cyril Aubaud, Stable Isotope Geochemistry Team

Projet SOSIE porté par Cyril Aubaud, équipe de Géochimie des Isotopes Stables

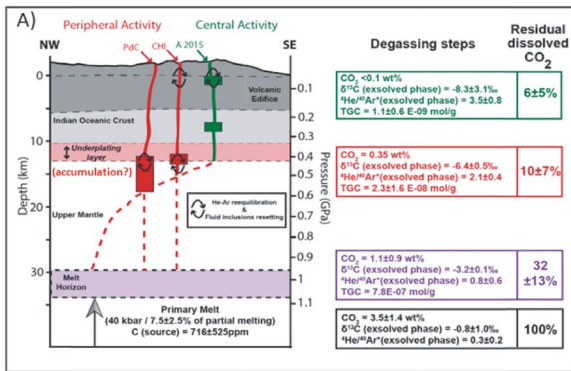
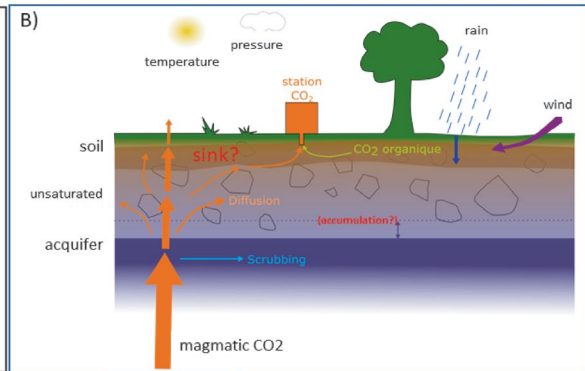


Schéma descriptif du projet. Descriptive diagram of the project.



Évolution des compositions et techniques des vitraux du Moyen Âge

Le vitrail médiéval est une source importante d'informations sur la technologie et les processus de production du verre médiéval, ainsi que sur les sensibilités esthétiques et les développements artistiques du début du Moyen Âge. En adoptant une approche de science des matériaux, nous proposons d'étudier les principaux développements dans la composition

Evolution of the compositions and techniques of medieval stained glass

Medieval stained glass is an important source of information about medieval glass technology and production processes, as well as about aesthetic sensibilities and artistic developments in the early Middle Ages. By adopting a material science approach, we propose to study the major developments in the composition and technology of stained



et la technologie du vitrail du 12^e au 15^e siècle. Nous nous appuyons sur des données existantes pour créer une base de données ouverte. La compilation des données existantes sera complétée par de nouvelles analyses chimiques, qui seront réalisées à l'aide de XRF portable et de LA-ICP-MS, grâce à des collaborations établies (Musée de Cluny). Ces mesures permettront de créer une base de données des changements de composition dans le temps et l'espace en France et de fournir des informations sur les origines des matières premières (à la fois le verre de base et les colorants).

Les données seront également utilisées pour des reproductions en laboratoire afin de répondre à deux questions clés : (i) déterminer l'évolution des techniques de fabrication du verre avec les changements de composition par des mesures de viscosité, une propriété du verre qui, bien qu'essentielle pour la conception du vitrail, a encore été peu étudiée ; (ii) le rôle des colorants sera exploré, en particulier comment certains éléments (Co, Cu, Fe) modifient la rhéologie du verre. Un aspect innovant de ce projet est le développement d'une base de données ouverte conçue pour former des algorithmes d'apprentissage automatique reliant composition, structure et propriétés.

Cela permet l'intégration d'autres échantillons de verres anciens et permet une utilisation dans des applications modernes et industrielles. Dirigé par un consortium multidisciplinaire d'historiens spécialisés dans le verre ancien, ainsi que des experts en chimie analytique et en physique du verre, VitRAGE offre des perspectives complètes et uniques sur les processus de fabrication du vitrail, ainsi que sur les raisons sous-jacentes des changements technologiques et de composition.

Projet VitRAGE mené en partenariat avec Daniel Neuville, équipe Géomatériaux

glass from the 12th to the 15th century. We will draw on existing data to create an open database. The compilation of legacy data will be complemented by new chemical analyses, which will be carried out using portable XRF and LA-ICP-MS, thanks to established collaborations (Musée de Cluny). These measurements will help create a database of compositional changes over time and space in France and provide insights into the origins of the raw materials (both base glass and colourants).

The data will also be used for laboratory reproductions to address two key questions: (i) to determine the evolution of glassmaking techniques with changes in compositions through viscosity measurements, a glass property that, although essential for the design of stained glass, has not yet been systematically investigated; (ii) the role of colorants will be explored, particularly how certain elements (Co, Cu, Fe) modify the rheology of glass. An innovative aspect of this project is the development of an open database designed to train machine learning algorithms linking composition, structure, and properties. This allows for the integration of other ancient glass samples and enables their use in modern and industrial applications. Led by a multidisciplinary consortium of historians specialized in ancient glass, along with experts in analytical chemistry and glass physics, VitRAGE offers comprehensive and unique insights into stained glass manufacturing processes, as well as the underlying reasons for technological and compositional changes.

VitRAGE project carried out in partnership with Daniel Neuville, Geomaterials



Photo d'un vitrail de l'abbaye de Königsfelden.
Photo of a stained-glass window at Königsfelden Abbey.



BioMetCrit: innover pour valoriser les métaux critiques et transformer les déchets en ressources

BioMetCrit: innovating to valorize critical metals and transform waste into resources

Créée en 2022 au sein de l'Atrium des Géosciences de L'Institut de physique du globe de Paris (IPGP), la chaire industrielle « Biométallurgie pour la valorisation des Métaux Critiques » (BioMetCrit), portée par le Professeur Éric Van Hullebusch, est un pilier du développement des recherches partenariales en transition écologique et économie circulaire.

BioMetCrit développe des procédés de biométallurgie innovants, fondés sur l'utilisation de micro-organismes et de biomolécules, pour récupérer sélectivement les métaux critiques présents dans les déchets électroniques et les technologies bas carbone. Ces métaux – indispensables aux téléphones, écrans, batteries lithium-ion, éoliennes ou panneaux solaires – sont au cœur des enjeux industriels, technologiques et environnementaux. La chaire propose ainsi des alternatives aux procédés conventionnels, contribuant à sécuriser l'approvisionnement et à réduire l'empreinte écologique des filières d'extraction et de raffinage des métaux critiques.

Un axe central est le concept de « mines urbaines » : les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), cartes de circuits imprimés (PCB), batteries lithium-ion en fin de vie ou certains résidus industriels constituent de véritables gisements secondaires de métaux stratégiques, tels que lithium, cobalt, nickel, gallium, indium et certaines terres rares (Villa Gomez *et al.*, 2025). L'exploitation de ces flux anthropiques via des procédés biométallurgiques permet de valoriser ces ressources tout en limitant l'extraction primaire et ses impacts environnementaux.

Established in 2022 within the Geosciences Atrium of the Institut de physique du globe de Paris (IPGP), the industrial chair “Biometallurgy for the Recovery of Critical Metals” (BioMetCrit), led by Professor Éric van Hullebusch, is a key pillar in the development of collaborative research on ecological transition and the circular economy.

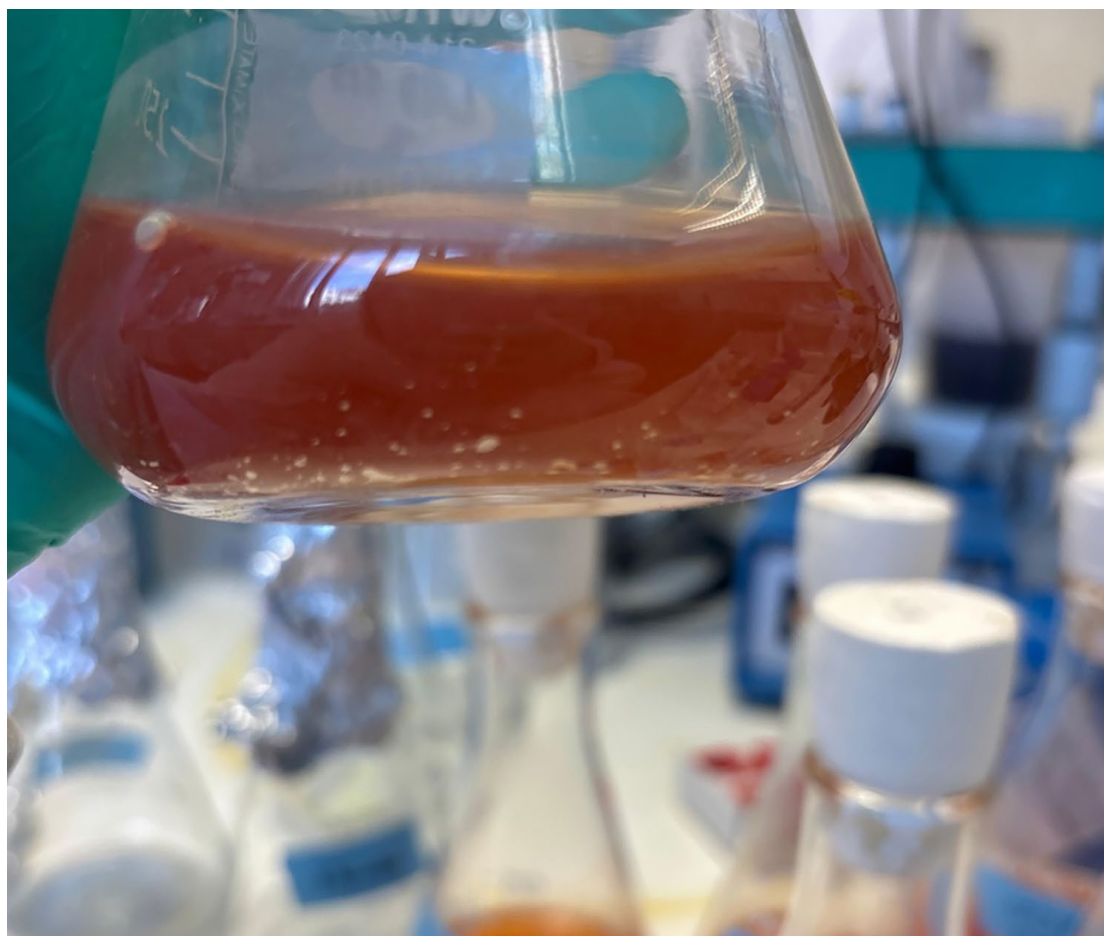
BioMetCrit develops innovative biometallurgical processes based on the use of microorganisms and biomolecules to selectively recover critical metals found in electronic waste and low-carbon technologies. These metals—essential for phones, screens, lithium-ion batteries, wind turbines, and solar panels—are at the heart of major industrial, technological, and environmental challenges. The chair thus proposes alternatives to conventional processes, helping to secure supply chains and reduce the environmental footprint of critical metal extraction and refining industries.

A central focus is the concept of “urban mining”: waste electrical and electronic equipment (WEEE), printed circuit boards (PCBs), end-of-life lithium-ion batteries, and certain industrial residues constitute genuine secondary deposits of strategic metals such as lithium, cobalt, nickel, gallium, indium, and certain rare earth elements (Villa Gomez *et al.*, 2025). Exploiting these anthropogenic streams through biometallurgical processes makes it possible to recover valuable resources while limiting primary extraction and its environmental impacts.



La chaire s'appuie sur des projets collaboratifs européens et des partenariats industriels. Le projet BaCLEM (Bio-assisted Closed Loop recycling of E-Mobility Metals from waste PCBs and Li-Ion Batteries), soutenu par le programme ERA-MIN2 (2020-2024), a développé le recyclage en boucle fermée de métaux issus de cartes électroniques et batteries lithium-ion, en collaboration avec Syngulon (Belgique) et Exitcom (Turquie) (Kompalitch et van Hullebusch, 2024).

The chair relies on European collaborative projects and industrial partnerships. The BaCLEM project (Bio-assisted Closed Loop recycling of E-Mobility Metals from waste PCBs and Li-Ion Batteries), supported by the ERA-MIN2 program (2020-2024), developed closed-loop recycling of metals from electronic boards and lithium-ion batteries, in collaboration with Syngulon (Belgium) and Exitcom (Turkey) (Kompalitch & van Hullebusch, 2024).



Lixiviation de masse noire de batterie lithium-ion par une bactérie ferro-oxydante (Crédit Amanda Suarez)
Leaching of lithium-ion battery black mass by an iron-oxidizing bacterium (Crédit Amanda Suarez)

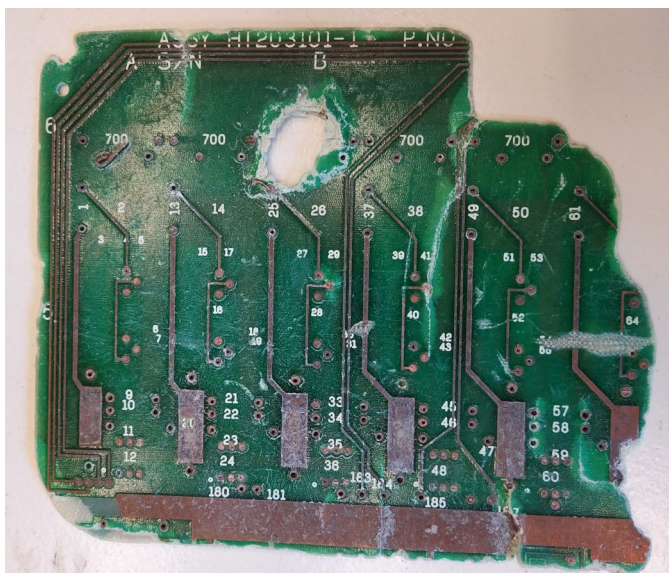


BioMetCrit participe également au projet SideroGaln (Siderophores assisted recovery of Gallium and Indium from e-waste recycling waste) (2025-2027), développé à partir du projet ERA-MIN2 Siderec (Siderophores assisted Biorecovery of Technology Critical Elements : Gallium (Ga), germanium (Ge) and indium (In) from end-of-life products), dédié à la récupération du gallium et de l'indium à partir de déchets électroniques, tels que lampes LED usagées (Zheng *et al.*, 2024a) et écrans LCD (Zheng *et al.*, 2024b). SideroGaln associe l'IPGP à WeeeCycling (France), HZDR – Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf et ASA Spezialenzyme (Allemagne), et explore l'utilisation de sidérophores comme agents biologiques de complexation sélective, renforçant la valorisation des flux issus des mines urbaines.

Dans le cadre de la chaire, le Professeur Éric van Hullebusch a participé à une expertise collective du Centre national de la recherche scientifique (CNRS) sur les terres rares, métaux stratégiques aux enjeux industriel, technologique, géopolitique, économique, environnemental et sanitaire. L'Expertise Scientifique Collective (ESCo) « Terres rares » du CNRS établit l'état des connaissances sur leur cycle de vie, en abordant sobriété, recyclage et évolutions des modes d'extraction et de production. Cette initiative illustre l'engagement de BioMetCrit dans une approche systémique des ressources minérales et des gisements urbains. L'expertise est accessible ici : <https://www.cnrs.fr/fr/nos-recherches/expertise-scientifique-collective/esco-terres-rares>.

BioMetCrit is also involved in the SideroGaln project (Siderophores-assisted recovery of Gallium and Indium from e-waste recycling waste) (2025-2027), developed from the ERA-MIN2 Siderec project (Siderophores-assisted Biorecovery of Technology Critical Elements: Gallium (Ga), germanium (Ge), and indium (In) from end-of-life products). This project focuses on recovering gallium and indium from electronic waste such as used LED lamps (Zheng *et al.*, 2024a) and LCD screens (Zheng *et al.*, 2024b). SideroGaln brings together IPGP with WeeeCycling (France), HZDR – Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (Germany), and ASA Spezialenzyme (Germany), and explores the use of siderophores as biological agents for selective complexation, enhancing the valorization of streams derived from urban mining.

As part of the chair activities, Professor Éric van Hullebusch contributed to a collective scientific assessment by the French National Centre for Scientific Research (CNRS) on rare earth elements—strategic metals with industrial, technological, geopolitical, economic, environmental, and health implications. The CNRS Collective Scientific Expertise (ESCo) “Rare Earths” reviews the current state of knowledge on their life cycle, addressing resource efficiency, recycling, and evolving extraction and production methods. This initiative highlights BioMetCrit’s commitment to a systemic approach to mineral resources and urban deposits. The report is available here: <https://www.cnrs.fr/fr/nos-recherches/expertise-scientifique-collective/esco-terres-rares>.



Carte de circuit imprimé (© Eric van Hullebusch).
Printed circuit board (© Eric van Hullebusch).

En 2025, l'IPGP a organisé le Workshop BioHyMet-2025 : Biohydrométallurgie et recyclage des métaux critiques, rassemblant des participants académiques et industriels pour partager les développements récents en biohydrométallurgie appliquée aux flux de déchets primaires et secondaires. L'événement s'est tenu le mercredi 2 avril 2025 à l'IPGP, Paris, France. Face aux défis environnementaux et à la demande croissante de métaux critiques, le workshop a permis de discuter des dernières avancées scientifiques et technologiques, sous le mot d'ordre : « L'avenir de la récupération des métaux critiques réside dans l'innovation durable. »

Au-delà des projets et événements emblématiques, BioMetCrit structure un écosystème de recherche associant chercheurs, doctorants, post-doctorants et partenaires industriels autour d'objectifs communs : développement de procédés durables, transfert technologique, montée en maturité industrielle et contribution à l'économie circulaire des métaux critiques. En intégrant les mines urbaines, les expertises nationales et l'animation scientifique via des workshops comme BioHyMet, la chaire confirme sa place de référence à l'interface entre géosciences, microbiologie et ingénierie des procédés, contribuant activement à une gestion durable et responsable des métaux critiques.

In 2025, IPGP organized the BioHyMet-2025 Workshop: Biohydrometallurgy and Critical Metal Recycling, bringing together academic and industrial participants to share recent developments in biohydrometallurgy applied to primary and secondary waste streams. The event took place on Wednesday, April 2, 2025, at IPGP in Paris, France. In response to environmental challenges and the growing demand for critical metals, the workshop provided a forum to discuss the latest scientific and technological advances under the theme: "The future of critical metal recovery lies in sustainable innovation."

Beyond flagship projects and events, BioMetCrit structures a research ecosystem that brings together researchers, PhD students, postdoctoral fellows, and industrial partners around shared objectives: developing sustainable processes, enabling technology transfer, advancing industrial maturity, and contributing to the circular economy of critical metals. By integrating urban mining, national expertise, and scientific engagement through workshops such as BioHyMet, the chair reinforces its position as a leading reference at the interface of geosciences, microbiology, and process engineering, actively contributing to the sustainable and responsible management of critical metals.



Masse noire de batteries lithium-ion.
Black mass from lithium-ion batteries.

Ref : Villa Gomez, D. K., van Hullebusch, E. D., Pat Espadas, A. M., & Nancucheo, I. (2025). **Biotechnologies to recover critical metals.** *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, 1747699.

Zheng, K., Benedetti, M. F., Jain, R., Pollmann, K., & van Hullebusch, E. D. (2024a). **Recovery of gallium (and indium) from spent LEDs : Strong acids leaching versus selective leaching by siderophore desferrioxamine E.** *Separation and Purification Technology*, 338, 126566.

Zheng, K., Benedetti, M. F., Jain, R., Guy, B. M., Pollmann, K., & van Hullebusch, E. D. (2024b). **Selective leaching of indium from spent LCD screens by siderophore desferrioxamine E.** *Journal of Hazardous Materials*, 469, 134013.

Kompalitch, A. H., & van Hullebusch, E. D. (2024). **Integration of bioleaching and biorefinery technologies for the recovery of base and critical elements from electronic waste.** In *Biotechnological Innovations in the Mineral-Metal Industry* (pp. 179-206). Cham : Springer International Publishing.





Nouveaux instruments

New instruments





Mesure absolue de la température de formation des carbonates

Accurate temperature of carbonate formation

En sciences de la Terre, les compositions isotopiques stables sont largement utilisées pour la caractérisation des matériaux (roches, minéraux, liquides, gaz) afin de renseigner sur leur origine ou leur mécanisme (conditions thermodynamiques, degré d'avancement) de formation ou de modification au cours des temps géologiques. Un exemple emblématique de leur utilisation est la thermométrie des isotopes stables de l'oxygène, ou thermométrie $\delta^{18}\text{O}$, basée sur l'échange des isotopes ^{18}O et ^{16}O entre deux phases, par exemple le minéral carbonaté et l'eau. Ce thermomètre est basé sur la préférence thermodynamique de l'isotope lourd ^{18}O , qui est aussi le plus rare, à entrer dans la structure du minéral à basse température. Cependant, la thermométrie $\delta^{18}\text{O}$, largement utilisée depuis 70 ans pour remonter aux températures de formation des minéraux, nécessite deux hypothèses *a priori* sur : la composition isotopique en oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) du fluide minéralisateur d'une part, et d'équilibre isotopique lors de la cristallisation d'autre part.

La thermométrie des clumped isotopes* des carbonates, aussi appelée thermométrie Δ_{47}^{**} , est basée sur la préférence thermodynamique des isotopes rares/lourds ^{18}O et ^{13}C à former, à basse température, des liaisons $^{13}\text{C}-^{18}\text{O}$ dans la structure des minéraux carbonatés. Cette thermométrie a vu le jour en 2005 grâce à l'avènement de nouveaux spectromètres de masse permettant la quantification, avec suffisamment de précision, de la très faible abondance naturelle des molécules contenant l'association entre ces deux isotopes lourds ($^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$ dans le cristal de carbonate). Le thermomètre Δ_{47} étant porté par une seule phase (le carbonate), permet l'estimation de la température de formation du minéral sans faire d'hypothèse *a priori* sur le $\delta^{18}\text{O}$ du fluide minéralisateur – balayant ainsi une des limitations majeures de la thermométrie $\delta^{18}\text{O}$.

Stable isotope compositions are widely used in Earth Sciences to reconstruct the origin of geological materials (rocks, minerals, aqueous fluids or gases) or to better constrain the processes responsible of their formation or alteration over geological timescales (e.g., thermodynamic conditions, extent of reactions). A classic example of such use is the oxygen isotope thermometry, or $\delta^{18}\text{O}$ thermometry, based on the exchange of ^{18}O and ^{16}O isotopes between two phases, such as carbonate (or silicate) and water (H_2O). This thermometer is based on the thermodynamic preference of the heavier isotope ^{18}O , which is also the rarer one, to be incorporated in the mineral structure at low temperatures. However, the $\delta^{18}\text{O}$ thermometry, extensively used over the past 70 years, requires two strong *a priori* assumptions to reconstruct the formation temperature of the mineral: the oxygen isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$) of the mineralizing fluid, on the one hand, and the state of isotopic equilibrium during mineral formation, on the other.

Clumped isotope thermometry* of carbonates, also known as Δ_{47} thermometry**, relies on the thermodynamic preference, at low temperatures, for rare/heavy isotopes ^{18}O and ^{13}C to bond with each other ($^{13}\text{C}-^{18}\text{O}$ bonds) within the carbonate lattice. This thermometry was born in 2005, thanks to the advent of new mass spectrometers capable of quantifying, with sufficient precision, the very low natural abundance of carbonate molecules with the $^{13}\text{C}-^{18}\text{O}$ clumping ($^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$ within the carbonate lattice). The Δ_{47} thermometer, based on a single phase (the carbonate), thus allows to estimate the formation temperature of carbonate without the need for any *a priori* assumptions on the $\delta^{18}\text{O}$ of the mineralizing fluid.



Mission de terrain pour la récolte de fossiles carbonatés datant de 65 millions d'années (Seymour Island, Antarctique) en vue de reconstruire, via l'analyse du clumping double Δ_{47} - Δ_{48} , les variations de température de l'océan à haute latitude autour de la limite K/T. © Magali Bonifacie.

Field trip for collecting carbonate fossils from 65 million years (Seymour Island, Antarctica) to reconstruct, through analysis of dual-clumped Δ_{47} - Δ_{48} compositions, ocean temperature variations at high latitudes at the K/T boundary. © Magali Bonifacie.

La thermométrie Δ_{47} a donc permis, en une vingtaine d'années, de revisiter de très nombreuses questions scientifiques fondamentales et appliquées, comme par exemple l'amplitude des variations de température des océans et des continents pour certaines périodes géologiques clés ou encore les températures de circulation des fluides dans la croûte et les sédiments. Ces avancées scientifiques ont largement bénéficié d'avancées méthodologiques et sur les fondements pour l'utilisation raisonnée de ce nouveau traceur - dont certaines significatives ont été menées à l'IPGP, comme par exemple la calibration robuste du thermomètre Δ_{47} pour tous les minéraux carbonatés pour des températures entre 1 et 200°C ou encore la caractérisation de matériaux de référence communautaires via un exercice international regroupant 26 laboratoires - et accélérées par une communauté interactive et à croissance exponentielle. Cependant, dans de nombreux cas d'applications (par ex. matériaux spécifiques précipités très rapidement ou bio-minéraux), la vérification de l'hypothèse d'état d'équilibre restait encore nécessaire avant d'accéder à un thermomètre réellement « absolu ».

The Δ_{47} thermometry has thus lead scientists to revisit numerous fundamental and applied questions, such as: the amplitude of temperature variations in the oceans and continents over several geological periods (Photo 1) or the temperatures of fluids circulation in the crust and sediments. These scientific advances have greatly benefited from methodological and fundamental breakthroughs - some of which were carried out at IPGP (e.g., robust calibration of the Δ_{47} thermometer for temperature ranging from 1 to 200°C and for all carbonate minerals, or the characterization of reference materials through an international exercise involving 26 laboratories) - driven by an interactive and rapidly growing community. However, in many applications (e.g., specific materials such as bio-minerals or rapidly-grown carbonates), the thermodynamic equilibrium over precipitation still need to be checked before reaching a truly "absolute".



Magali Bonifacie a porté plusieurs projets pour contourner cette dernière hypothèse grâce à l'acquisition et le développement de l'ensemble du dispositif instrumental pour la mesure du clumping isotopique double dans *tous* les minéraux carbonatés. Pour accéder à cette information, via la thermométrie duale $\Delta_{47}-\Delta_{48}^{***}$, l'IPGP s'est notamment doté d'un spectromètre de masse permettant la détermination simultanée et à haute précision des abondances de $^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$ mais aussi de $^{12}\text{C}^{18}\text{O}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ dans la structure des carbonates. En plus d'améliorer la justesse des interprétations (en contournant les hypothèses obligatoires des autres thermomètres), l'ensemble des nouveaux équipements permettent d'améliorer très significativement : les performances analytiques (en atteignant les précisions limites de $\pm 1^\circ\text{C}$), les coûts énergétiques et humains, les capacités d'analyse (4 fois plus d'échantillons de taille diminuée de moitié) et l'accès à de nombreux utilisateurs via la plateforme PARI.

Magali Bonifacie has led several projects aimed at overcoming this last hypothesis through the acquisition and development of a comprehensive set of instruments for measuring the dual-clumped compositions $\Delta_{47}-\Delta_{48}^{***}$ in *all* carbonate minerals. IPGP has indeed recently acquired a mass spectrometer (Photo 2) for the simultaneous and high precision determination of the abundances of both $^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$ and $^{12}\text{C}^{18}\text{O}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ in the crystal lattice. This new facility will not only improve the accuracy of temperature estimates and interpretations (by circumventing assumptions of previous thermometers), but will also significantly improve: the analytical performances (targeted accuracies of $\pm 1^\circ\text{C}$), energy and labor costs, analytical capacities (sample rates increased by four times, sample size decreased by at least two times) and access for multiple users via the PARI platform.



Instrumentation dédiée aux mesures duales $\Delta_{47}-\Delta_{48}$: spectromètre de masse (à double introduction et secteur magnétique) pour l'analyse du CO_2 gazeux extrait des minéraux carbonatés par un système de préparation/purification couplé.

Facility used for measurements of dual-clumped $\Delta_{47}-\Delta_{48}$ compositions : mass spectrometer (with dual-inlet introduction and a magnetic field) for the analysis of gaseous CO_2 extracted from carbonate minerals using a coupled preparation and purification line.



Cet équipement représente un potentiel hautement fédérateur à l'IPGP et au-delà, en témoigne le soutien apporté aux projets par un large réseau national de partenaires et plusieurs sources de financements franciliens : région Île de France DIM PAMIR, Université Paris Cité, CNRS, IPGP, MNHN, GEOPS, IMPMC, ISTEP. En effet, compte tenu de la polyvalence des traceurs développés d'une part, et de la multitude d'application et de questions scientifiques qui pourront être revisités (*ie.*, la plupart où $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ sont déjà utilisés) avec des précisions inégalées d'autre part, cet équipement est la source de nombreuses nouvelles collaborations. Il permet également, par analyse du carbonate uniquement, de caractériser d'autres conditions de formation ou d'altération des carbonates, centrales à d'autres questions scientifiques pour lesquelles la température n'est pas le premier paramètre d'intérêt (par ex. origine du fluide minéralisateur, paléo-altimétrie, origine des matériaux biologique ou abiotique, préservation du signal isotopique originel, identification des mécanismes de bio-carbonatation jouant un rôle majeur dans le contrôle du cycle du carbone).

*La géochimie des « clumped isotopes », dont la thermométrie Δ_{47} est la première et la plus répandue des applications, s'intéresse aux propriétés et à la distribution des molécules contenant au moins deux isotopes rares (dites « molécules multi-substituées »). Son éclosion au California Institute of Technology en 2004 représente une avancée significative pour la géochimie des isotopes stables, qui jusqu'alors était majoritairement focalisée sur la distribution des molécules contenant un seul isotope rare.

** La thermométrie Δ_{47} se base sur la mesure de l'abondance relative des isotopologues de masse 47 (majoritairement $^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ contenant les deux isotopes lourds/rare ^{13}C et ^{18}O) dans le CO_2 gazeux extrait par attaque acide des minéraux carbonatés solides, mais plus de ~20 000 fois plus rares que l'isotopologue le plus abondant du CO_2 ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$, de masse 44) ou encore ~90 fois plus rare que celui d'intérêt pour la détermination de la composition isotopique stable traditionnelle $\delta^{18}\text{O}$ ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$, de masse 46).

*** La thermométrie duale $\Delta_{47}-\Delta_{48}$ se base sur la mesure de l'abondance conjointe de $^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ et $^{12}\text{C}^{18}\text{O}^{18}\text{O}$ (isotopologues du CO_2 de masse 47 et 48, respectivement). $^{12}\text{C}^{18}\text{O}^{18}\text{O}$ étant 10 fois moins abondant que l'isotopologue de masse 47, sa mesure à haute précision nécessite un spectromètre de masse de dernière génération et des adaptations méthodologiques et technologiques menées par l'équipe de Géochimie des Isotopes Stables de l'IPGP en collaboration avec le constructeur.

This new facility holds great promises for fostering collaboration at IPGP and beyond – as evidenced by the support provided to these projects by a broad national network of partners and numerous funding sources in the Île-de-France area: DIM PAMIR, Université Paris Cité, CNRS, IPGP, MNHN, GEOPS, IMPMC, and ISTEP. Indeed, given the combination of both the versatility of this new tracer and the multitude of applications and scientific questions that can be revisited with unprecedented precisions (*ie.*, most for which $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ are already used), this facility will foster numerous new collaborations. It will also allow, via the analysis of the carbonate phase only, the characterization of other conditions of their formation or alteration, which are central to other scientific questions where temperature is not the primary parameter of interest (*e.g.*, origin of the mineralizing fluid, origin of biological abiotic materials, preservation of the original isotopic signal, identification of biocarbonation mechanisms playing a major role in controlling the carbon cycle).

*The geochemistry of “clumped isotopes” (of which Δ_{47} thermometry is the first and most widespread application) focuses on the properties and distribution of molecules containing at least two rare isotopes (known as “multi-substituted molecules”). Its birth in 2004 at the California Institute of Technology marked a major turning point for stable isotope geochemistry, which until then had been primarily focused on the distribution of molecules containing a single rare isotope.

** Δ_{47} thermometry is based on measuring the relative abundance of mass 47 isotopologues (primarily $^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$, containing the two heavy/rare isotopes ^{13}C and ^{18}O) in gaseous CO_2 extracted from carbonate minerals via reaction with phosphoric acid, but more than ~20,000 times rarer than the CO_2 isotopologue most abundant ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$, mass 44) or ~90 times rarer than the one targeted for determining the traditional stable isotopic composition $\delta^{18}\text{O}$ ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$, mass 46).

*** Dual clumped thermometry $\Delta_{47}-\Delta_{48}$ is based on the measurement of the combined abundance of $^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ and $^{12}\text{C}^{18}\text{O}^{18}\text{O}$ (CO_2 isotopologues with mass 47 and 48, respectively). Since $^{12}\text{C}^{18}\text{O}^{18}\text{O}$ is 10 times less abundant, its high-precision measurement requires a state-of-the-art mass spectrometer together with methodological and technological adaptations—currently being developed by the IPGP's Stable Isotope Geochemistry team in collaboration with the manufacturer.



Écouter la Lune avec une précision inédite : des capteurs d'InSight à la révolution optique LOVBB

Listening to the Moon with unprecedented precision: from InSight sensors to the LOVBB optical revolution

Après le succès de la mission InSight sur Mars, le modèle de rechange du sismomètre martien (« SEIS ») a été démonté pour en extraire trois capteurs de vol mis en stockage à l'IPGP avec un modèle terrestre. Deux d'entre eux sont reconditionnés pour la lune, l'un pour la mission CLPS12 (Farside Seismic Suite), et l'autre pour la mission Artemis IV (South Pole Seismic Suite).

Ces capteurs ont une résolution bien supérieure à ceux d'Apollo, première mission à avoir installé des sismomètres sur la lune. Toutefois, ils ne permettront pas de mesurer le bruit de fond sismique produit par la Lune. C'est pourquoi l'équipe PSS en parallèle de son effort pour faire voler tous les capteurs de rechange d'InSight prépare une nouvelle génération de sismomètres lunaires dont le niveau de bruit instrumental en basse fréquence est 100 fois inférieur à celui des sismomètres extraterrestres actuels ($10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\sqrt{\text{Hz}}$ du mHz au 1 Hz) pour des vols dans les années 2030 : LOVBB (Lunar Optical Very Broad Band).

Following the success of the InSight mission on Mars, the spare model of the Martian seismometer ("SEIS") was dismantled to extract three flight-qualified sensors, which are now stored at IPGP alongside a terrestrial model. Two of these sensors are being refurbished for lunar deployment: one for the CLPS12 mission (Farside Seismic Suite), and the other for the Artemis IV mission (South Pole Seismic Suite). These sensors offer significantly higher resolution than those deployed during the Apollo missions, the first to install seismometers on the Moon. However, they will not be able to measure the Moon's ambient seismic noise. To address this limitation, the PSS team, in parallel with its efforts to launch all remaining InSight spare sensors, is developing a new generation of lunar seismometers. These instruments will achieve an instrumental noise level at low frequencies 100 times lower than current extraterrestrial seismometers ($10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}/\sqrt{\text{Hz}}$ from mHz to 1 Hz), with planned missions in the 2030s: LOVBB (Lunar Optical Very Broad Band).

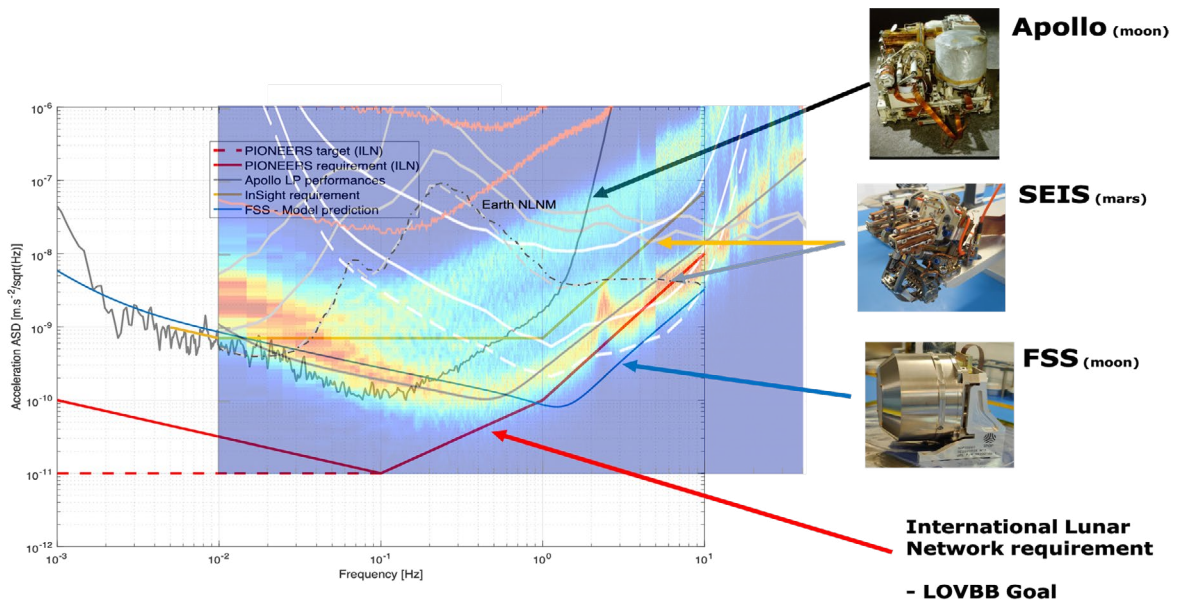


Figure : Performances comparées des niveaux de bruits des sismomètres Apollo, SEIS (sur Mars), FSS et LOVBB. Comparative performance of noise levels of Apollo seismometers, SEIS (on Mars), FSS and LOVBB.



Pour atteindre de telles performances, le capteur de déplacement électrostatique est remplacé par un capteur interférométrique. L'interférométrie optique permet ce saut de performances avec un capteur de déplacement alliant très bas bruit ($\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$) et forte dynamique (5mm), mais aussi potentiellement l'élargissement à une véritable filière d'instruments photoniques à usage multiple (gradiomètre, accéléromètre en micro gravité, sismomètre de rotation ...).

Pour la conception de capteur, l'équipe PSS s'appuie sur la start-up MAÀGM.

Créée en 2024, elle est issue d'une équipe d'experts reconnus en photonique et mécatronique, à l'origine de capteurs innovants (gyroscopes, sismomètres, navigation inertielle, transfert temps/fréquence). Forte de ce savoir-faire, elle développe des instruments scientifiques inédits pour les géosciences. Identifiée par l'IPGP et le CNES comme partenaire clé pour le développement du sismomètre optique spatial, MAÀGM entend faire de ce développement commun un levier stratégique vers une nouvelle gamme de produits, notamment les sismomètres de rotation.

MAÀGM et l'équipe PSS travaillent à la caractérisation et la modélisation des performances de ce capteur, financé par le programme Recherche et Technologie (R&T) du CNES. Un contrat de collaboration a donc été signé entre le CNRS, l'IPGP et le MAÀGM pour cadrer les apports de chacun et la propriété intellectuelle partagée.

To reach such performance levels, the electrostatic displacement sensor is replaced by an interferometric sensor. Optical interferometry enables this breakthrough by combining ultra-low noise ($\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$) with high dynamic range (5 mm). It also opens the way to a broader family of photonic instruments with multiple applications (gradiometers, micro-gravity accelerometers, rotational seismometers, etc.).

For sensor development, the PSS team is partnering with the startup MAÀGM. Founded in 2024, the company stems from a team of recognized experts in photonics and mechatronics, behind innovative sensors (gyroscopes, seismometers, inertial navigation systems, time/frequency transfer). Building on this expertise, MAÀGM develops novel scientific instruments for geosciences. Identified by IPGP and CNES as a key partner for the development of a spaceborne optical seismometer, MAÀGM aims to leverage this collaboration to establish a new product line, particularly in rotational seismometers.

MAÀGM and the PSS team are currently working on the characterization and modeling of this sensor's performance, supported by CNES's Research and Technology (R&T) program. A collaboration agreement has been signed between CNRS, IPGP and MAÀGM to define each partner's contributions and shared intellectual property.

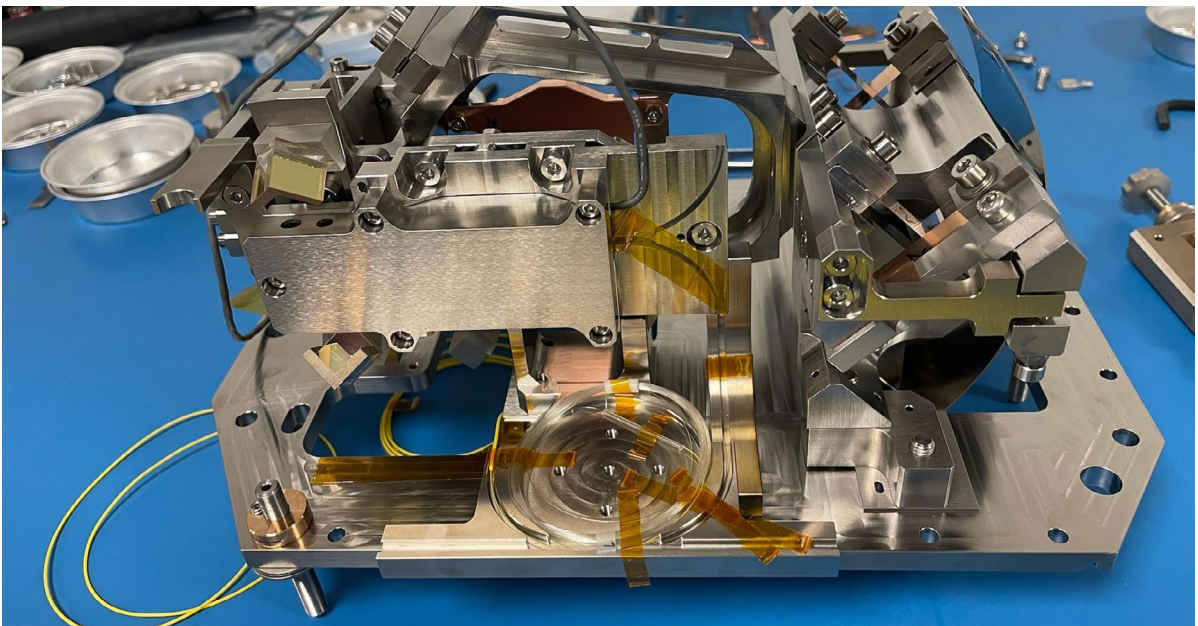


Figure : photo du premier prototype LOVBB.
Photograph of the first LOVBB prototype.



Prix et distinctions

Awards and honours



Catherine Chauvel

Cosmochimie, Astrophysique
et Géophysique Expérimentale
(CAGE)

Cosmochemistry, Astrophysics
and Experimental Geophysics
(CAGE)



Prix Léon Lutaud de
l'Académie des sciences
The Léon Lutaud Prize from
the Academy of Sciences



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE



Daniel Neuville

Géomatériaux
Geomaterials



Prix George W. Morey
George W. Morey Award



Fidel Costa

Systèmes volcaniques
Volcanic Systems



Norman L. Bowen Award
& Lecture de l'American
Geophysical Union

Norman L. Bowen Award
& Lecture of the American
Geophysical Union





Frédéric Moynier

Cosmochimie, Astrophysique
et Géophysique Expérimentale
(CAGE)

Cosmochemistry, Astrophysics
and Experimental
Geophysics (CAGE)



Médaille de l'engagement
de l'Université Paris Cité
Paris Cité University Medal
of Commitment



Frédéric Girault

Lithosphère Organosphère
Microbiosphère (LOMs)

Lithosphere Organosphere
Microbiosphere (LOMs)



Membre junior de l'Institut
universitaire de France

Awarded a junior chair
Junior Member of the Institut
universitaire de France



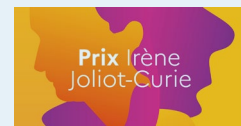
Kristel Chanard

Géodésie
Geodesy



Prix Irène Joliot-Curie
(catégorie jeune femme
scientifique)

Joliot-Curie Prize (young
female scientist category)





Marouchka Froment

Planétologie et
Sciences Spatiales
Planetology and
Space Sciences



Prix de Géophysique du Comité
National Français de Géodésie
et Géophysique (CNFGG)

French National Committee
for Geodesy and Geophysics
(CNFGG) Prize



Michel Diament

Géodésie
Geodesy



Membre titulaire du Bureau
des Longitudes

Full member of the Bureau
des Longitudes





Nouveaux chercheurs et enseignants-chercheurs

New researchers and professors



Arnaud Salvador

Arnaud Salvador obtient son doctorat en sciences planétaires à l'Université Paris-Saclay en 2018. Il rejoint brièvement l'IPGP en 2019 pour un premier post-doctorat. À la suite de la pandémie de Covid-19 et de la fermeture des frontières, il part aux États-Unis pour quatre ans dans le cadre d'un financement du programme Habitable Worlds de la NASA, d'abord à la Northern Arizona University (1 an et 7 mois), puis au Lunar and Planetary Laboratory de l'Université d'Arizona (2 ans et 5 mois).

En 2025, il intègre le centre aérospatial allemand (DLR) à Berlin, en lien avec la mission Planetary Transits and Oscillations of Stars (PLATO) de l'Agence spatiale européenne.

Fin 2025, il obtient une chaire de professeur junior à l'Université Paris Cité affectée à l'IPGP, où il développe un programme de recherche consacré à la géologie des exoplanètes. Ses travaux portent sur la formation, l'évolution et l'habitabilité des planètes rocheuses, ainsi que sur leur caractérisation au-delà du Système solaire. Il s'intéresse en particulier à l'évolution des océans magmatiques et à leurs interactions avec l'atmosphère afin de comprendre la formation des océans d'eau primitifs et l'émergence de la vie.

Il travaille également sur l'interprétation des observations des futures missions spatiales dédiées à la recherche d'exoplanètes habitables et de signatures d'origine biologique. Ses travaux contribuent à la préparation scientifique du Habitable Worlds Observatory, ainsi qu'à l'exploitation des données de PLATO, en vue de mieux contraindre les conditions de surface et d'habitabilité des planètes lointaines.

Arnaud Salvador obtained his PhD in planetary science from Université Paris-Saclay in 2018. He briefly joined IPGP in 2019 for his first postdoctoral position.

Following the Covid-19 pandemic and international border closures, he moved to the United States for four years with funding from NASA's Habitable Worlds program, first at Northern Arizona University (1 year and 7 months), and then at the Lunar and Planetary Laboratory at the University of Arizona (2 years and 5 months). In 2025, he joined the German Aerospace Center (DLR) in Berlin, in connection with the European Space Agency's Planetary Transits and Oscillations of Stars (PLATO) mission.

At the end of 2025, he was appointed to a junior professorship chair at Université Paris Cité, hosted at IPGP, where he is developing a research program focused on the geology of exoplanets.

His research focuses on the formation, evolution, and habitability of rocky planets, as well as their characterization beyond the Solar System. He is particularly interested in the evolution of magma oceans and their interactions with the atmosphere, in order to understand the formation of early water oceans and the emergence of life. He also works on the interpretation of observations from future space missions dedicated to the search for habitable exoplanets and biosignatures. His work contributes to the scientific preparation of the Habitable Worlds Observatory, as well as to the exploitation of PLATO data, with the aim of better constraining the surface conditions and habitability of distant worlds.



Équipe Team : Cosmochimie,
Astrophysique et Géophysique
Expérimentale

*Cosmochemistry, Astrophysics,
and Experimental Geophysics*

Thème Theme : Origines
Origins

Statut Position :
Enseignant Chercheur
- Université Paris Cité

Lecturer and Researcher

Contact : salvador@ipgp.fr



Essam Heggy

Essam Heggy est un physicien spécialisé dans l'étude de l'évolution hydroclimatique des milieux arides et planétaires. Il rejoint l'IPGP en 2025, après 24 ans comme chercheur aux États-Unis à la NASA Jet Propulsion Laboratory, Caltech, l'University of Southern California, Lunar and Planetary Institute et NASA Johnson Space Center. Docteur de Sorbonne Université en 2002, il est spécialiste des méthodes de télédétection radar appliquées à l'étude des environnements terrestres et planétaires désertiques.

Ses recherches portent sur la caractérisation des changements hydroclimatiques des régions arides et de leurs aléas naturels, tels que les sécheresses, les inondations et les érosions côtières, ainsi que sur la distribution des volatils dans le sous-sol de Mars, de la Lune, des astéroïdes, des comètes et des satellites glacés. Il mobilise des approches intégrées combinant les méthodes d'imagerie radar, les sondages géophysiques, la modélisation électromagnétique et hydroclimatique, ainsi que la conception instrumentale des systèmes radar.

Au cours des vingt dernières années, il a contribué au développement de plusieurs instruments radar pour les missions spatiales de la NASA et de l'ESA (MARSIS, Mini-RF, CONSERT, RIME, WISDOM et NiSAR) et a dirigé des concepts innovants pour des missions radar terrestres et planétaires au sein de la NASA.

À l'IPGP, il va renforcer les efforts de suivi interférométrique des volcans actifs, ainsi que les synergies entre l'hydrologie des régions arides et les sciences planétaires, afin de développer des observations radar innovantes pour mieux comprendre la dynamique des environnements désertiques extrêmes et des risques naturels dans un contexte de changement climatique.

Essam Heggy is a physicist specializing in the study of hydroclimatic evolution in arid and planetary environments. He joined IPGP in 2025 after 24 years as a researcher in the United States, notably at the NASA Jet Propulsion Laboratory, Caltech, the University of Southern California, the Lunar and Planetary Institute, and NASA Johnson Space Center. He earned his Ph.D. from Sorbonne Université in 2002 and is an expert in radar remote sensing techniques applied to the study of terrestrial and planetary desert environments. His research focuses on characterizing hydroclimatic changes in arid regions and their associated natural hazards, such as droughts, floods, and coastal erosion, as well as on the distribution of volatiles in the subsurface of Mars, the Moon, asteroids, comets, and icy satellites. He employs integrated approaches combining radar imaging, geophysical surveying, electromagnetic and hydroclimatic modeling, as well as the design of radar instrumentation systems. Over the past two decades, he has contributed to the development of several radar instruments for NASA and ESA space missions (MARSIS, Mini-RF, CONSERT, RIME, WISDOM, and NiSAR) and has led innovative concepts for terrestrial and planetary radar missions within NASA.

At IPGP, he will strengthen efforts in interferometric monitoring of active volcanoes and enhance synergies between arid-region hydrology and planetary science, with the aim of developing innovative radar observations to better understand the dynamics of extreme desert environments and natural hazards in the context of climate change.



Équipe Team : Systèmes volcaniques
Volcanic systems

Thème Theme : Risques naturels
Natural Hazards

Statut Position :
Enseignant Chercheur CNAP
Lecturer and Researcher

Contact : heggy@ipgp.fr



Filipe Terra-Nova

Géophysicien spécialisé en géomagnétisme, archéomagnétisme, paléomagnétisme et dynamique de noyau, il revendique une approche large – « jack of all trades, master of none » – adaptée à la nature multi-échelles du champ magnétique terrestre. Ses travaux couvrent des échelles de temps allant de quelques décennies à plusieurs millions d'années afin de mieux comprendre le champ et l'intérieur profond de la Terre. Ils combinent observations, analyse de données et modélisation numérique avancée pour étudier la dynamique du noyau et ses signatures en surface.

Son parcours débute dès la licence avec le développement d'outils de calcul en C pour des modèles globaux du champ. Il s'intéresse très tôt à l'Anomalie de l'Atlantique Sud. Soutenu par la FAPESP (Fondation de recherche de São Paulo), il mène des recherches au Brésil puis au LPG de Nantes, où il développe des algorithmes de détection des structures de flux inversé. En master, il améliore la fiabilité des modèles par des méthodes de filtrage.

Docteur de Nantes Université (2018), il met en évidence le rôle de structures profondes liées au manteau inférieur et propose une nouvelle interprétation de l'Anomalie de l'Atlantique Sud. Il réalise aussi des simulations de dynamo montrant l'impact du flux thermique.

Après un postdoctorat à São Paulo puis un contrat CNES à Nantes, il développe des méthodes d'inférence des écoulements du noyau et étudie les inversions du champ. Ses travaux s'étendent aujourd'hui à la planétologie, avec l'étude des océans subglaciaires des lunes glacées. Il vise à mieux comprendre les inversions géomagnétiques et leurs précurseurs.

A geophysicist specializing in geomagnetism, archaeomagnetism, paleomagnetism and core dynamics, he adopts a deliberately broad approach—"jack of all trades, master of none"—suited to the multi-scale nature of Earth's magnetic field. His work spans timescales from decades to several million years, aiming to better understand both the magnetic field and Earth's deep interior. It combines observations, data analysis, and advanced numerical modeling to investigate core dynamics and their surface expressions.

He began his scientific path during his undergraduate studies, developing C-based computational tools for global geomagnetic field models. He developed an early interest in the South Atlantic Anomaly. Supported by FAPESP (São Paulo Research foundation), he conducted research in Brazil and at the LPG in Nantes, where he developed algorithms to detect reversed flux structures. During his master's, he improved model reliability using filtering methods.

He earned his PhD from Nantes Université in 2018, highlighting the influence of deep-seated structures linked to the lower mantle and proposing a new interpretation of the South Atlantic Anomaly. He also carried out dynamo simulations demonstrating the key role of heat flux variations.

Following a postdoctoral position at the University of São Paulo and a CNES-funded postdoc in Nantes, he developed methods to infer core flows and study magnetic field reversals. His research now extends to planetary science, focusing on the dynamics of subsurface oceans in icy moons. He aims to better understand geomagnetic reversals and identify potential precursors.



Équipe Team : Observatoires magnétiques

Magnetic Observatories

Thème Theme : Système Terre
Earth System

Statut Position :

Enseignant Chercheur CNAP
Lecturer and Researcher

Contact : terranova@ipgp.fr



Muhammad Usman

Muhammad Usman a rejoint L'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) en septembre 2025 en tant que maître de conférences au sein de l'équipe Biogéochimie à l'Anthropocène des éléments et contaminants émergents (ACE). Issu d'une formation en sciences du sol, il a obtenu un doctorat en chimie à l'Université de Lorraine, à Nancy, en 2011, et a ensuite développé une carrière académique en France, en Allemagne (Humboldt Fellow), à Oman et au Pakistan, où il a occupé des fonctions d'enseignement et de recherche.

Ses recherches s'inscrivent dans le domaine de la géochimie de l'environnement, avec un intérêt particulier pour le devenir, le transport réactif et la remédiation des polluants organiques dans les systèmes sol-eau. En combinant approches expérimentales, études interfaciales et modélisation du transport réactif, il étudie les processus de sorption et d'oxydoréduction aux interfaces solide-eau afin de mieux comprendre comment les contaminants interagissent avec les matériaux de l'environnement et comment ces interactions contrôlent leur mobilité, leur persistance et leur transformation dans les systèmes naturels.

Ses travaux visent également à traduire cette compréhension mécanistique des interactions des polluants avec les matériaux de l'environnement en stratégies concrètes de remédiation des sols et des eaux pollués. Il s'intéresse en particulier aux minéraux de fer redox-actifs et aux composites carbonés, notamment à base de biochar, pour des applications environnementales. À travers cette articulation entre travaux fondamentaux et appliqués, il entend renforcer à l'IPGP la recherche sur le devenir, le transport réactif et la remédiation des contaminants organiques émergents dans les systèmes sol-eau.



Équipe Team : Biogéochimie à l'Anthropocène des éléments et contaminants émergents

Biogeochemistry at the Anthropocene of Elements and Emerging Contaminants

Thème Theme : Système Terre Earth System

Statut Position : Enseignant Chercheur Université Paris Cité Lecturer and Researcher

Contact : usman@ipgp.fr

Muhammad Usman joined the Institut de physique du globe de Paris (IPGP) in September 2025 as Associate Professor in the "Biogeochemistry at the Anthropocene of Elements and Emerging Contaminants" (ACE) team. With a background in Soil Science, he obtained his PhD in Chemistry from the University of Lorraine, Nancy, France, in 2011, and subsequently developed an academic career across France, Germany (Humboldt Fellow), Oman, and Pakistan, holding teaching and research positions.

His research lies in the field of environmental geochemistry, with a particular focus on the fate, reactive transport, and remediation of organic pollutants in soil-water systems. Combining experimental approaches, interfacial investigations, and reactive transport modeling, he studies sorption and redox processes at solid-water interfaces to understand how contaminants interact with environmental materials and how these interactions control their mobility, persistence, and transformation in natural systems.

His work also aims to translate this mechanistic understanding of pollutant interactions with environmental materials into practical remediation strategies for contaminated soils and waters. In particular, he works on redox-active iron minerals and carbonaceous composites, including biochar-based materials, for environmental applications. Through this combination of fundamental and applied work, he aims to strengthen research at IPGP on the fate, reactive transport, and remediation of emerging organic contaminants in soil-water systems.



UNIVERSITE DE PARIS
FACULTE
DES SCIENCES



Intérieurs de la Terre et des planètes

Earth and Planetary Interiors

Les processus physico-chimiques intervenant à l'intérieur de la Terre sont responsables de multiples phénomènes observables à sa surface, tels que l'activité tellurique et volcanique ou encore l'existence du champ magnétique. La dynamique interne d'une planète détermine son évolution au cours des temps géologiques et sa compréhension nécessite une recherche pluridisciplinaire et le déploiement d'innovations technologiques de pointe. Des expériences innovantes en conditions extrêmes de pression et de température permettent de répliquer directement les processus de formation des noyaux planétaires, et plus particulièrement celui de la Terre.

En 2025, trois études majeures ont renouvelé notre compréhension du manteau terrestre. La première montre que la formation d'un océan de magma basal résulte d'une ségrégation gravitationnelle entre liquides riches en fer et solides plus légers, offrant une nouvelle lecture de la structure chimique profonde de la Terre primitive. La deuxième met en évidence, grâce aux données GRACE, des mouvements rapides de masse à la base du manteau, suggérant des dynamiques à courte échelle de temps dans une zone clé d'interaction avec le noyau. Enfin, une troisième étude révèle un mécanisme de recyclage du carbone marin lié à la subduction, soulignant le rôle des réservoirs profonds dans le cycle global du carbone.

Ces travaux illustrent l'interconnexion des processus internes, de la différenciation initiale aux échanges entre profondeur et surface, et éclairent la dynamique des planètes telluriques.

The physicochemical processes occurring within the Earth are responsible for many surface phenomena, such as seismic and volcanic activity and the existence of the magnetic field. A planet's internal dynamics govern its long-term geological evolution and require multidisciplinary research alongside the deployment of cutting-edge technological innovations. Innovative experiments under extreme pressure and temperature conditions are enabling scientists to directly replicate the processes involved in planetary core formation.

In 2025, three major studies have renewed our understanding of the Earth's mantle. The first shows that the formation of a basal magma ocean results from gravitational segregation between iron-rich liquids and lighter solids, offering a new perspective on the deep chemical structure of the primitive Earth. The second highlights, using GRACE satellite data, rapid mass movements at the base of the mantle, suggesting short-timescale dynamics in a key region of interaction with the core. Finally, a third study reveals a mechanism for recycling marine carbon linked to subduction, underscoring the role of deep reservoirs in the global carbon cycle.

These findings illustrate the interconnected nature of internal processes, from initial differentiation to exchanges between the deep interior and the surface, and shed new light on the dynamics of terrestrial planets.

#1

Solidification du manteau terrestre : nouvel éclairage sur la formation d'un océan de magma basal

Solidification of the Earth's mantle : new insight into the formation of a basal magma ocean

Une équipe internationale de L'Institut de physique du globe de Paris (CNRS / IPGP / Université Paris Cité) et de la York University a revisité l'interprétation des structures géophysiques enracinées à la base du manteau terrestre. Leurs travaux remettent en question les modèles traditionnels de solidification du manteau primitif de la Terre. Grâce à une modélisation numérique avancée, intégrant une approche multiphasique de la dynamique des fluides, cette étude apporte un nouvel éclairage sur les processus de différenciation chimique et thermique ayant conduit à la formation d'un océan de magma basal.

Un processus de solidification réinterprété

Jusqu'à présent, la communauté scientifique débattait du point de départ de la solidification du manteau liquide : débutait-elle en profondeur pour progresser vers la surface, ou l'inverse ? Cette étude démontre que cette question est secondaire. L'élément déterminant réside dans la ségrégation gravitationnelle entre les liquides denses, riches en fer, et les solides plus légers, pauvres en fer. Ce phénomène naturel a conduit à l'accumulation de liquides riches en oxyde de fer au-dessus du noyau terrestre, donnant naissance à un océan de magma basal.

En intégrant les relations de phase, les diagrammes de fusion et la répartition des éléments chimiques au cours de la solidification, la modélisation numérique utilisée dans cette étude a permis d'estimer la composition et la distribution spatiale des réservoirs géochimiques primordiaux. Ces résultats trouvent un écho direct dans les anomalies isotopiques observées dans les roches anciennes.

Des implications majeures pour l'histoire géochimique de la Terre

L'équipe a également mis en évidence la formation d'une quantité significative de solides en surface plutôt qu'en profondeur. Cette observation suggère que des signatures géochimiques issues du fractionnement des silicates superficiels ont été injectées dans le manteau profond, remettant en question les interactions entre la dynamique du manteau terrestre, la pétrologie et la géochimie au cours des premiers milliards d'années de l'évolution des planètes rocheuses.

An international team of researchers from the Institut de physique du globe de Paris (CNRS / IPGP / Université Paris Cité) and York University has revisited the interpretation of geophysical structures rooted at the base of the Earth's mantle. Their work challenges traditional models of the solidification of Earth's primitive mantle. Through advanced numerical modeling, incorporating a multiphase fluid dynamics approach, this study sheds new light on the chemical and thermal differentiation processes that led to the formation of a basal magma ocean.

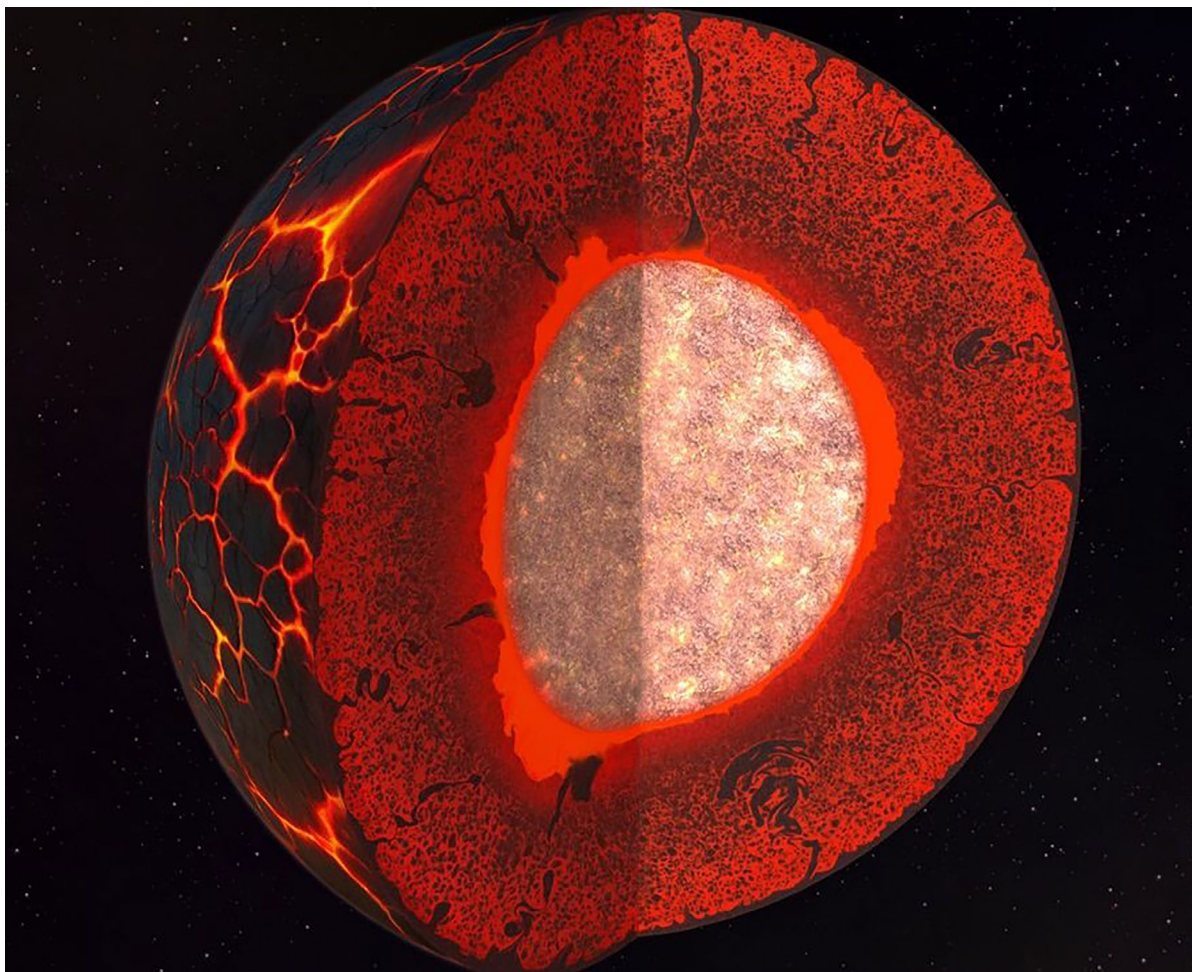
A reinterpreted solidification process

Until now, the scientific community has debated where mantle solidification began: did it start deep down and progress upward, or the reverse? This study shows that this question is secondary. The key factor lies in the gravitational segregation between dense, iron-rich liquids and lighter, iron-poor solids. This natural phenomenon led to the accumulation of iron oxide-rich liquids above the Earth's core, giving rise to a basal magma ocean.

By integrating phase relationships, melting diagrams, and the distribution of chemical elements during solidification, the numerical modeling used in this study allowed the researchers to estimate the composition and spatial distribution of primordial geochemical reservoirs. These results resonate directly with isotopic anomalies observed in ancient rocks.

Major implications for Earth's geochemical history

The researchers also highlighted the formation of a significant amount of solids at the surface rather than at depth. This observation suggests that geochemical signatures resulting from the fractionation of surface silicates were injected into the deep mantle, challenging current understanding of the interactions between Earth's mantle dynamics, petrology, and geochemistry during the early evolution of rocky planets.



Par ailleurs, ces travaux révèlent que la formation d'un océan de magma basal était inévitable sur Terre, y compris dans les conditions les plus défavorables. De plus, l'empreinte géochimique de cette solidification sur le manteau solide est bien moins marquée que ne le prédisaient les modèles géochimiques classiques, en raison d'un brassage vertical intense durant la solidification.

Ces découvertes ouvrent la voie à une réévaluation des observations géochimiques et géophysiques, permettant de reconstruire avec plus de précision l'histoire thermique et chimique de la Terre depuis sa formation. Plus largement, elles apportent un éclairage nouveau sur la diversité des corps rocheux dans notre système solaire et au-delà.

Moreover, the study reveals that the formation of a basal magma ocean on Earth was inevitable—even under the most unfavorable conditions. In addition, the geochemical imprint of this solidification on the solid mantle is far less pronounced than previously predicted by classical geochemical models, due to intense vertical mixing during solidification.

These discoveries pave the way for a re-evaluation of geochemical and geophysical observations, enabling a more precise reconstruction of Earth's thermal and chemical history since its formation. More broadly, they offer new insight into the diversity of rocky bodies in our solar system and beyond.

Ref : Charles-Édouard Boukaré, James Badro, Henri Samuel (2025). **Solidification of Earth's mantle led inevitably to a basal magma ocean.** *Nature* 114, DOI : 10.1038/s41586-025-08701-z

Contact : James Badro (équipe CAGE) | badro@ipgp.fr

#2

Des mouvements rapides à la base du manteau détectés par les satellites GRACE

Rapid motions at the base of the mantle detected by the GRACE mission

La frontière entre le manteau et le noyau de la Terre constitue une interface planétaire majeure, à la base d'une région complexe du manteau profond, la couche D'', dont les propriétés restent mal connues. L'évolution temporelle de cette interface pourrait jouer un rôle important dans les couplages dynamiques du manteau avec les variations rapides des courants conducteurs au sein du noyau liquide, sources du champ géomagnétique principal. En apportant de nouvelles informations sur les mouvements de masse dans cette région frontière via les variations temporelles de la gravité de la Terre, la mission GRACE pourrait ainsi nous aider à mieux comprendre l'intérieur profond de notre planète.

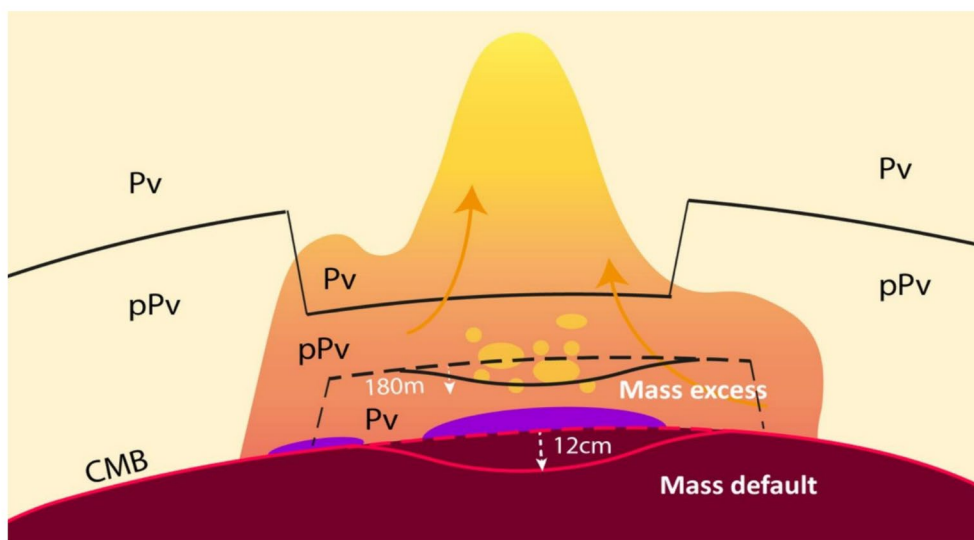
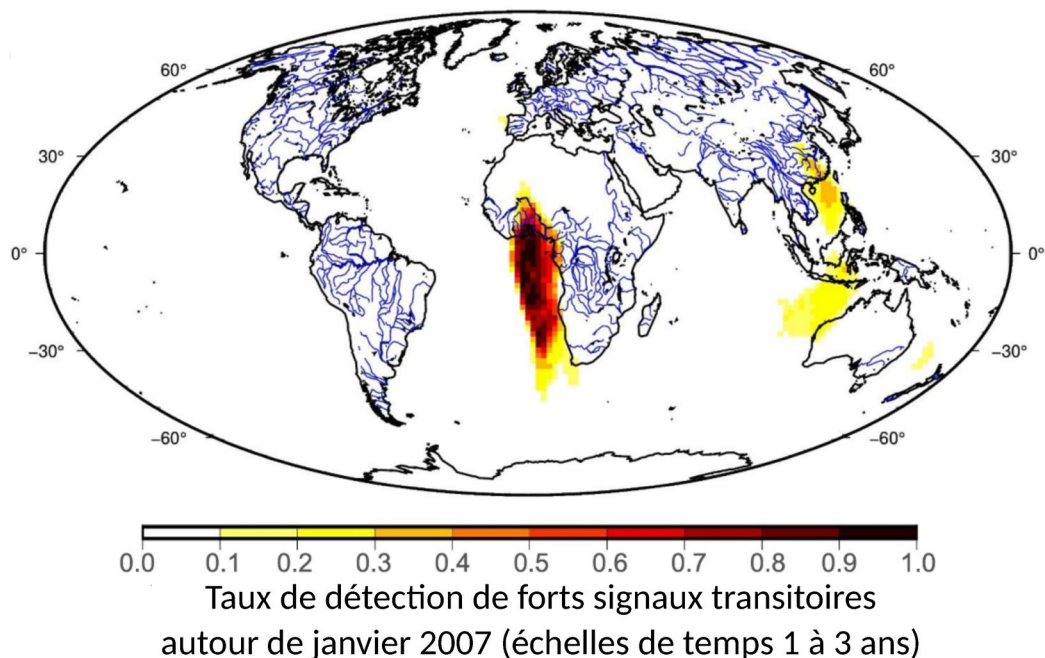
Une étude menée par des équipes de L'Institut de physique du globe de Paris (IPGP), en collaboration avec leurs partenaires au CNES et à l'Institut Terre et Environnement de Strasbourg, a ainsi identifié dans les données GRACE un signal gravimétrique anormal dans l'océan Atlantique Est, d'intensité maximale début 2007. Évoluant sur des échelles temporelles de l'ordre de quelques mois à 2-3 ans, ce signal s'avère spatialement et temporellement concomitant avec une secousse géomagnétique importante. Les analyses montrent que son origine ne peut être entièrement expliquée par les redistributions de masses d'eau dans les enveloppes fluides externes, et met probablement en jeu des mouvements rapides à la base du manteau.

Ce travail suggère ainsi l'existence de processus à courte échelle de temps dans le manteau profond, étendant des études précédentes des données GRACE dans lesquelles des mouvements mantelliques rapides avaient été détectés aux profondeurs du manteau supérieur, au niveau des plaques tectoniques subduites. L'origine physique de ces déplacements de masse reste à étudier. L'hypothèse proposée est qu'ils se produisent lors d'une transition entre deux phases minérales de densités différentes, la pérovskite et la post-pérovskite, au sein de régions thermiquement hétérogènes entraînées vers le haut, à la base de panaches du manteau inférieur. Ils pourraient s'accompagner de changements dynamiques de l'ordre du décimètre dans la topographie de la CMB, susceptibles d'interagir avec les courants du noyau et le champ géomagnétique.

The boundary between the Earth's mantle and core constitutes a major planetary interface at the base of a complex region of the deep mantle, the D'' layer, which properties remain poorly understood. Its temporal evolution is a key factor in elucidating the dynamic interactions between the mantle and the rapid variations in conductive currents within the liquid core, which generate the main geomagnetic field. By providing new information on mass redistributions in the region of this boundary through temporal variations in the Earth's gravity, the GRACE mission could thus help us better understand the deep interior of our planet.

A study conducted by two teams from the Institut de physique du globe de Paris (IPGP), in collaboration with their partners at CNES and the Institut Terre et Environnement in Strasbourg, has identified an anomalous gravimetric signal in the GRACE data over the Eastern Atlantic Ocean, with a maximum intensity at the beginning of 2007. Evolving over time scales ranging from a few months to 2-3 years, this signal is spatially and temporally coincident with an important geomagnetic jerk. The analyses show that its origin cannot be fully explained by redistributions of water masses in the outer fluid layers of the Earth, and likely involves rapid movements at the base of the mantle.

This work thus suggests the existence of processes operating at short timescales in the deep mantle, extending previous investigations of the GRACE data where rapid motions had been detected at upper mantle depths, within subducted tectonic plates. The physical origin of these mass redistributions remains to be investigated. The proposed hypothesis is that they occur during a phase transition between two phases of different densities of the main lower mantle mineral, the perovskite and post-perovskite phases, within thermally heterogeneous regions entrained upwards at the base of lower mantle plumes. This could lead to dynamic changes in the CMB topography on the order of a decimeter, potentially interacting with the flow at the top of the core and the geomagnetic field.



(Haut) Région où un signal transitoire à grande échelle est détecté dans les gradients de gravité horizontaux reconstruits à partir des données GRACE. (Bas) Modèle proposé. Un changement de phase minérale se produit au sein de matériel thermiquement hétérogène (bulles jaunes) entraîné à la base de panaches du manteau profond, et déplace verticalement l'interface entre les deux phases. Ces redistributions de masse perturbent la frontière noyau-manteau.

(Top) Region where a large-scale transient signal is detected in the horizontal gravity gradients reconstructed from the GRACE data. (Bottom) Proposed model. A mineral phase change occurs within thermally heterogeneous material (yellow bubbles) entrained at the base of deep mantle plumes, leading to a vertical shift of the interface between the two phases. These mass redistributions dynamically deform the core-mantle boundary.

Ref : Charlotte Gagne Gouranton, Isabelle Panet, Marianne Greff-Lefftz, Mioara Mandea, Séverine Rosat (2025). **GRACE Detection of Transient Mass Redistributions During a Mineral Phase Transition in the Deep Mantle.** *Geophysical Research Letters* 52, DOI : 10.1029/2025GL116408

Contact : Isabelle Panet (équipe Géodésie) | panet@ipgp.fr



#3

Mise en évidence d'un mécanisme de recyclage du carbone marin dans le manteau terrestre

Evidence for a marine carbon recycling mechanism in Earth's mantle

Les travaux récents du doctorant Zheng-Yu Long, sous la direction de Frédéric Moynier, et de leurs collègues de l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP/Université Paris Cité/CNRS) et du CNRS ont mis en lumière un mécanisme qui participe au cycle du carbone terrestre, en lien avec la subduction des plaques océaniques. Leur étude, publiée dans *Science Advances*, indique que les carbonatites – des roches volcaniques peu fréquentes, riches en carbonates – présentent une signature isotopique particulière, vraisemblablement héritée de la croûte océanique subductée. Ces résultats suggèrent l'existence d'un processus de recyclage du carbone marin dans le manteau terrestre, qui pourrait contribuer à la régulation du cycle global du carbone et au maintien des conditions propices à la vie sur Terre.

Un processus au cœur de la dynamique du carbone profond

Les sédiments carbonatés qui s'enfoncent dans les zones de subduction sont souvent interstratifiés avec des couches argileuses, ou reposent sur une croûte océanique ignée altérée. En étudiant des carbonatites issues de milieux géologiques variés – océaniques et continentaux – sur une période couvrant deux milliards d'années, l'équipe a observé que leur composition isotopique en potassium semble refléter l'origine mantellique de ces roches, plutôt que des processus magmatiques secondaires.

Ces observations conduisent à penser que le recyclage des carbonates marins, notamment via la subduction de croûte océanique altérée, pourrait jouer un rôle important dans la dynamique des réservoirs profonds de carbone. L'origine des carbonatites, longtemps discutée, apparaît ainsi davantage liée à la fusion partielle de réservoirs mantelliques enrichis en carbonates recyclés.

Recent work by PhD student Zheng-Yu Long, under the supervision of Frédéric Moynier, and their colleagues at the Institut de physique du globe de Paris (IPGP/Université Paris Cité/CNRS) and the CNRS, has revealed a mechanism involved in Earth's carbon cycle, linked to the subduction of oceanic plates. Their study, published in *Science Advances*, shows that carbonatites – rare volcanic rocks rich in carbonates – exhibit a distinctive isotopic signature, likely inherited from subducted oceanic crust. These findings suggest the existence of a marine carbon recycling process within Earth's mantle that may contribute to the regulation of the global carbon cycle and the maintenance of life-supporting conditions on Earth.

A process at the heart of deep carbon dynamics

Carbonate sediments descending into subduction zones are often interlayered with clay-rich strata or rest on altered igneous oceanic crust. By analyzing carbonatites from a range of geological environments – both oceanic and continental – spanning the past two billion years, the team observed that their potassium isotopic composition seems to reflect a mantle-derived origin rather than secondary magmatic processes.

These observations suggest that the recycling of marine carbonates, particularly through the subduction of altered oceanic crust, may play a key role in the dynamics of deep carbon reservoirs. The long-debated origin of carbonatites thus appears more closely linked to the partial melting of mantle reservoirs enriched in recycled carbonates.



Volcanisme carbonatitique moderne au Ol Doinyo Lengai, Tanzanie.
Modern carbonatitic volcanism at Ol Doinyo Lengai, Tanzania / @Wiki.

Des éléments nouveaux pour mieux comprendre le cycle global du carbone

Les apports carbonatés impliqués dans ce processus pourraient provenir d'un panache mantellique profond ou résulter d'une interaction entre un panache et un manteau lithosphérique contenant des carbonates. Une fusion partielle très limitée pourrait alors produire des magmas carbonatitiques. Ce mécanisme de transfert du carbone en profondeur serait actif depuis au moins deux milliards d'années, y compris dans des contextes de subduction plus chaude.

Ces travaux apportent ainsi des éléments complémentaires pour mieux comprendre le cycle global du carbone. Ils mettent en avant la place des carbonatites dans la dynamique mantellique et soulignent la contribution probable de la croûte océanique subductée au recyclage du carbone, un processus important dans l'équilibre des conditions de surface de la Terre.

New insights into the global carbon cycle

The carbonate inputs involved in this process could stem from a deep mantle plume or result from interaction between a plume and lithospheric mantle containing carbonates. Even very limited partial melting could produce carbonatitic magmas. This deep carbon transfer mechanism has likely been active for at least two billion years, including under conditions of hotter subduction.

This research provides new insights into the global carbon cycle. It highlights the role of carbonatites in mantle dynamics and underscores the probable contribution of subducted oceanic crust to carbon recycling – a process crucial to maintaining Earth's surface conditions in balance.

Ref: Zheng-Yu Long, Frédéric Moynier, Baptiste Debret, Kun-Feng Qiu, Wei Dai, Hao-Xuan Sun, Jun Deng, Hervé Bertrand, Kevin Burton, Edward Inglis, Sebastian Tapp (2025). **Heavy potassium isotopes in carbonatites reveal oceanic crust subduction as the driver of deep carbon cycling.** *Science Advances* 11, DOI : 10.1126/sciadv.adt102

Contact : Frédéric Moynier (équipe CAGE) | moynier@ipgp.fr





Risques naturels

Natural hazards

Comprendre l'origine et le fonctionnement des éruptions volcaniques, des tremblements de terre, des tsunamis, des glissements de terrain ou encore des orages magnétiques constitue un enjeu majeur pour appréhender les aléas et risques associés. Ces phénomènes naturels demeurent le résultat de processus géologiques se produisant sur des échelles de temps et d'espace variées, dont l'analyse englobe la quasi-totalité des spécialités des Sciences de la Terre. Leur étude à l'IPGP combine des approches de terrain (observations et mesures continues ou ponctuelles, en observatoire, lors de campagnes en mer, etc.), des observations depuis l'espace, des études et analyses d'échantillons en laboratoire, ainsi que des modélisations théoriques.

En 2025, parmi les diverses avancées menées à l'IPGP, les trois études présentées ici illustrent plus particulièrement des travaux collaboratifs, inter-équipes, et sur la base de données acquises sur plusieurs années au sein des observatoires. À La Réunion, une nouvelle méthode sismologique, dite « Jerk », permet de détecter en temps réel des signaux précurseurs d'intrusions magmatiques et d'anticiper certaines éruptions. En Guadeloupe, l'analyse des isotopes du chlore dans les gaz volcaniques offre un nouveau traceur pour décrypter les interactions entre fluides magmatiques et système hydrothermal. Enfin, en Martinique, l'étude pluridisciplinaire de la réactivation de la Montagne Pelée met en évidence la remontée de fluides profonds et la dynamique d'un système volcanique en évolution, contribuant à affiner l'évaluation de l'aléa.

Understanding the origin and mechanisms of volcanic eruptions, earthquakes, tsunamis, landslides, and magnetic storms is crucial for assessing the associated hazards and risks. These natural phenomena result from geological processes that occur across a wide range of spatial and temporal scales, involving nearly all disciplines within Earth sciences. At the IPGP, their study combines field-based approaches (through continuous or episodic observations and measurements at observatories, during sea campaigns, etc.), satellite-based observations, laboratory analysis of samples, and theoretical modeling.

In 2025, among the various achievements conducted at IPGP, the three subsequent works illustrate more thoroughly collaborative research among various groups, based on data acquired over several years within the observatories. At La Reunion, a new seismological method, known as “Jerk,” enables the real-time detection of precursor signals of magmatic intrusions and the anticipation of certain eruptions. In Guadeloupe, the analysis of chlorine isotopes in volcanic gases provides a new tracer to decipher interactions between magmatic fluids and the hydrothermal system. Finally, in Martinique, a multidisciplinary study of the reactivation of Mount Pelée highlights the ascent of deep fluids and the evolving dynamics of a volcanic system, contributing to a refined assessment of hazards.

#1

« Jerk » : une nouvelle méthode prometteuse pour l'alerte précoce des éruptions volcaniques

"Jerk": a promising new method for early warning of volcanic eruptions

Prévoir une éruption volcanique à temps pour alerter les autorités et les populations reste un défi majeur à l'échelle mondiale. Dans une étude publiée dans le journal *Nature Communications*, des chercheurs et ingénieurs de L'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) et du GFZ Helmholtz Centre for Geosciences proposent une nouvelle méthode de détection, baptisée « Jerk » (en français : « à coup »), capable d'identifier en temps réel des signaux précurseurs précoces des éruptions volcaniques à partir d'un seul instrument sismologique.

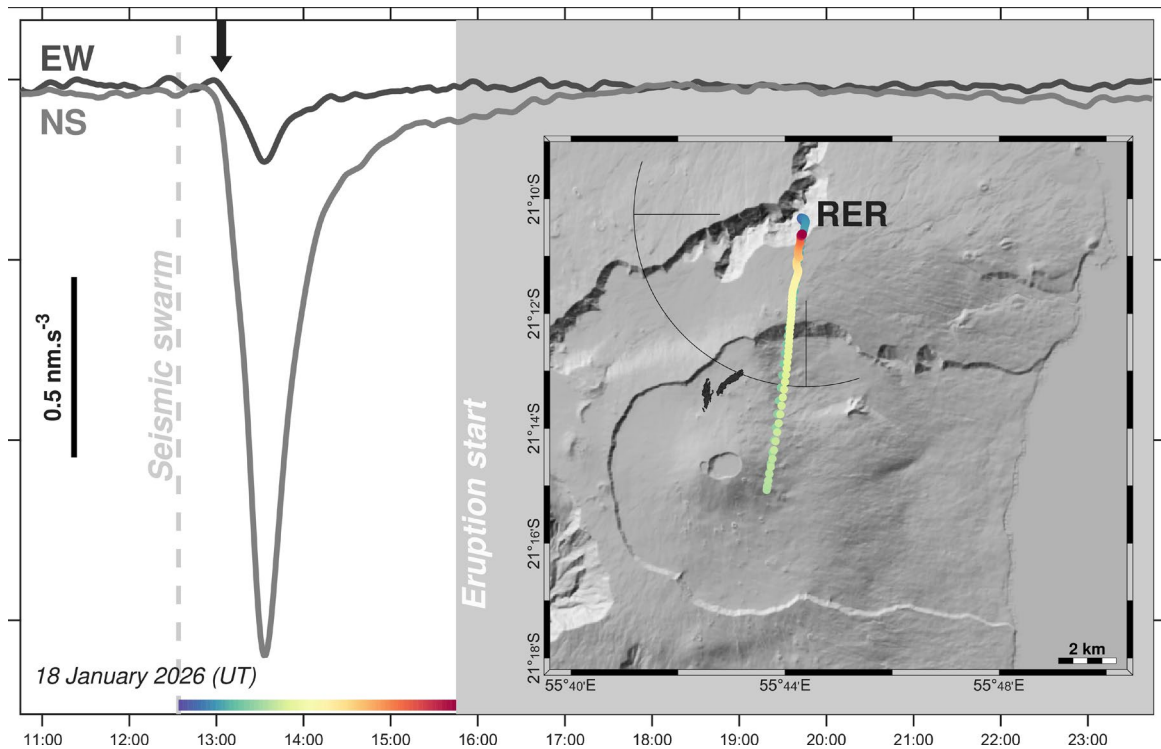
La méthode « Jerk » permet de détecter en temps réel des mouvements extrêmement subtils du sol liés aux injections de magma en profondeur. Ces signaux, appelés signaux Jerk, se manifestent sous la forme de transitoires à très basse fréquence observés dans les mouvements horizontaux du sol, à la fois en accélération et en inclinaison. Les auteurs montrent qu'ils sont probablement générés par les processus de fracturation dynamique de la roche précédant une éruption. D'une amplitude de l'ordre de quelques nanomètres par seconde cube (nm/s^3), ces signaux peuvent être détectés à l'aide d'un seul sismomètre à très large bande et à grande distance, moyennant un traitement spécifique intégrant notamment la correction des marées terrestres.

En avril 2014, l'outil a été implémenté à l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise de l'IPGP (OVPF-IPGP, île de La Réunion) comme un module entièrement automatisé du système WebObs, en exploitant les données de la station sismologique RER (Rivière de l'Est) du réseau mondial Geoscope, située à 8 km du sommet du volcan. Dès le 20 juin 2014, une première alerte a été envoyée 1 heure et 2 minutes avant le début de l'éruption. Durant plus de 10 années, ce système de détection et d'analyse des signaux Jerk a fonctionné en continu 24h/24, permettant d'émettre des alertes automatiques pour 92 % des 24 éruptions qui se sont produites entre 2014 et 2023. Les délais d'alerte varient de quelques minutes à 8,5 heures avant que le magma n'atteigne la surface. La méthode a également été testée sur les données de 24 anciennes éruptions entre 1998 et 2010, montrant que l'alerte Jerk fonctionne de façon systématique.

Predicting a volcanic eruption in time to alert the authorities and the population remains a major challenge worldwide. In a study published in the journal *Nature Communications*, researchers and engineers from the Institut de physique du globe de Paris (IPGP) and the GFZ Helmholtz Centre for Geosciences propose a new detection method, called "Jerk" (in physics, the time derivative of acceleration), capable of identifying early precursor signals of volcanic eruptions in real time using a single seismological instrument.

The "Jerk" method makes it possible to detect extremely subtle ground movements linked to deep magma injections in real time. These signals, called Jerk signals, manifest themselves as very low-frequency transients observed in horizontal ground movements, both in acceleration and inclination. The authors show that they are probably generated by the processes of dynamic rock fracturing preceding an eruption. With an amplitude of a few nanometres per cubic second (nm/s^3), these signals can be detected using a single very wideband seismometer at a great distance, using specific processing that includes correction for terrestrial tides.

In April 2014, the tool was implemented at the IPGP's Piton de la Fournaise Volcanological Observatory (OVPF-IPGP, La Réunion Island) as a fully automated module of the WebObs system, using data from the RER (Rivière de l'Est) seismological station of the Geoscope global network, located 8 km from the summit of the volcano. On 20 June 2014, the first alert was sent 1 hour and 2 minutes before the eruption began. For more than 10 years, this Jerk signal detection and analysis system has been operating continuously 24 hours a day, enabling automatic alerts to be issued for 92% of the 24 eruptions that occurred between 2014 and 2023. Alert times vary from a few minutes to 8.5 hours before the magma reaches the surface. The method has also been tested on data from 24 previous eruptions between 1998 and 2010, showing that the Jerk alert works consistently.



Le signal Jerk enregistré avant l'éruption du 18 janvier 2026 à la station RER : série temporelle des composantes horizontales et mouvement de particule sur la carte entre la crise sismique et l'éruption. La flèche verticale indique l'instant de l'alarme. En noir sur la topographie, les 2 coulées de lave provenant des fissures.

The Jerk signal recorded before the 18 January 2026 eruption at the RER station: time series of horizontal components and particle movement on the map between the seismic crisis and the eruption. The vertical arrow indicates the time of the alarm. The two lava flows emitted during this eruption are shown in black on the topography.

La récente éruption du 18 janvier 2026 a également été un succès : à 17h03 (heure locale), le système d'alerte Jerk a lancé un message téléphonique indiquant qu'une intrusion magmatique avait eu lieu. Celui-ci a atteint une amplitude maximale de $1,6 \text{ nm/s}^3$, soit une éruption quasi certaine qui s'est effectivement produite 2h45 plus tard (Figure).

The recent eruption on 18 January 2026 was also a success: at 17:03 (local time), the Jerk alert system sent a telephone message indicating that a magmatic intrusion had occurred. This reached a maximum amplitude of 1.6 nm/s^3 , indicating an almost certain eruption, which did indeed occur 2 hours and 45 minutes later (Figure).

La grande originalité de ces travaux réside dans le fait que la méthode Jerk a été testée et validée en temps-réel de façon automatique et non supervisée durant plus de 10 ans, contrairement à l'immense majorité des études de précurseurs éruptifs publiées dans la littérature qui se basent sur un post-traitement de données et une analyse a posteriori.

The great originality of this work lies in the fact that the Jerk method has been tested and validated in real time, automatically and without supervision, for more than 10 years, unlike the vast majority of studies on eruptive precursors published in the literature, which are based on post-processing of data and a posteriori analysis.

Le système a cependant produit quelques fois des "faux positifs" – des alertes claires mais non suivies d'éruption – qui se sont toutes révélées être de réelles intrusions de magma ou "éruptions avortées", une interprétation consolidée par tous les autres observables telles que la sismicité, les déformations et les analyses de gaz volcaniques. Outre l'efficacité de l'alerte Jerk pour les éruptions, l'outil se révèle ainsi un détecteur efficace et non-équivoque des intrusions magmatiques.

However, the system has occasionally produced "false positives" – clear alerts not followed by eruptions – which have all turned out to be real magma intrusions or "aborted eruptions", an interpretation supported by all other observable data such as seismicity, ground deformation and volcanic gas analyses. In addition to the effectiveness of the Jerk alert for eruptions, the tool has also proven to be an effective and unequivocal detector of magmatic intrusions.



Le Piton de la Fournaise étant un volcan laboratoire très instrumenté et surveillé, l'outil Jerk est utilisé par l'OVPF-IPGP comme indicateur complémentaire aux nombreux signes précurseurs des autres observables, permettant de confirmer la réalité d'une intrusion magmatique et la très forte probabilité d'une éruption à venir. Sur d'autres volcans peu instrumentés, l'outil Jerk pourrait être utilisé comme méthode simple et efficace d'alerte précoce des éruptions volcaniques. Il reste maintenant beaucoup à faire et en particulier tester la méthode sur d'autres volcans actifs, à commencer par l'Etna (Italie) où un projet impliquant l'infrastructure GIPP (Geophysical Instrumental Pool of Potsdam) visant à détecter le signal Jerk avec un nouveau réseau de sismomètres devrait débuter dès 2026, en collaboration avec l'INGV (Italie). Un autre projet est en préparation au volcan Merapi (Indonésie) dans le cadre du site instrumenté VELI (IRD).

As Piton de la Fournaise is a well-instrumented and monitored laboratory volcano, the Jerk tool is used by the OVPF-IPGP as a complementary indicator to the many precursory signs of other observable phenomena, confirming the reality of a magmatic intrusion and the very high probability of an upcoming eruption. On other volcanoes with few instruments, the Jerk tool could be used as a simple and effective method of early warning of volcanic eruptions. Much remains to be done, in particular testing the method on other active volcanoes, starting with Mount Etna (Italy) where a project involving the GIPP (Geophysical Instrumental Pool of Potsdam) infrastructure to detect the Jerk signal with a new network of seismometers is due to start in 2026, in collaboration with the INGV (Italy). Another project is in preparation at the Merapi volcano (Indonesia) as part of the VELI (IRD) instrumented site.



Éruption du 18-20 janvier 2026 (Photo : ©OVPF-IPGP).

Eruption of 18-20 January 2026 (Photo: ©OVPF-IPGP).

Ref : François Beauducel, Geneviève Roult, Valérie Ferrazzini, Aline Peltier, Philippe Jousset, Patrice Boissier & Nicolas Villeneuve. **Jerk, a promising tool for early warning of volcanic eruptions.** *Nat Commun* (2025).

En savoir plus / Read more :

<https://doi.org/10.1038/s41467-025-66256-z>

<https://www.ipgp.fr/observation/ovs/ovpf/>

<https://www.facebook.com/ObsVolcanoPitonFournaise>

<https://bsky.app/profile/ovpf.bsky.social>

<https://www.gfz.de/en/section/geophysical-imaging/infrastructure/geophysical-instrument-potsdam-gipp>

<https://veli.osug.fr>

Contact : François Beauducel - beauducel@ipgp.fr



#2

Réactivation volcanique de la Montagne Pelée (Martinique) depuis 2019

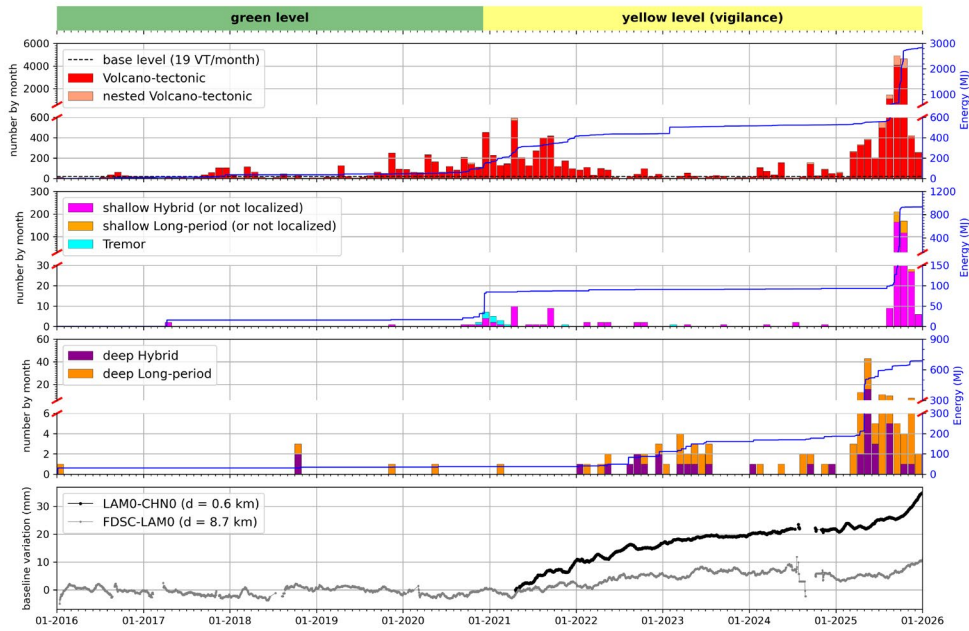
Ongoing multiparameter unrest at the Montagne Pelée volcano (Martinique) since 2019

La Montagne Pelée, en Martinique, l'un des stratovolcans les plus actifs de la zone de subduction des Petites Antilles, a connu quatre éruptions au cours des 250 dernières années, notamment les éruptions phréatiques de 1792 et 1851–1852, ainsi que les éruptions magmatiques avec formation de dôme en 1902–1905 et 1929–1932. Avec ses 29 000 morts, l'éruption de 1902–1905 a été la plus meurtrière du XX^e siècle dans le monde. *Le Rapport mondial d'évaluation sur la réduction des risques de catastrophe 2015* [<https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2015/en/home/download.html>, consulté au 1^{er} août 2024] indique que la Martinique figure parmi les régions les plus vulnérables au monde face aux risques volcaniques, en raison de son contexte insulaire et de la proportion de la population vivant à 30 km ou moins de ce volcan actif.

Cette étude, menée par une équipe pluridisciplinaire, principalement présente à l'IPGP, vise à documenter la réactivation volcanique de la Montagne Pelée depuis 2019 et à en modéliser l'origine, en exploitant l'énorme quantité de données sismiques, de déformation du sol et géochimiques collectées par l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Martinique (OVSM-IPGP). L'ensemble des données acquises a été interprété dans le contexte des connaissances acquises par les diverses équipes de l'IPGP et leurs collaborateurs sur l'activité éruptive passée de la Montagne Pelée. Le réseau sismique a permis la détection, la classification, la localisation et l'évaluation de l'énergie des séismes liés à l'activité volcanique. Par ailleurs, une modélisation numérique des données de déformation du sol, issues des stations du système de positionnement par satellites (GNSS), a été réalisée. Les dégâts causés à la végétation par les émissions de gaz ont été suivis à l'aide de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), et des analyses géochimiques, incluant les rapports isotopiques, des eaux et des émissions gazeuses ont été menées pour compléter l'analyse.

Montagne Pelée in Martinique, one of the most active stratovolcanoes of the Lesser Antilles subduction zone, has experienced four eruptions over the last 250 years including the phreatic eruptions of 1792 and 1851–1852, as well as magmatic dome-building eruptions in 1902–1905 and 1929–1932. With its 29,000 deaths, the infamous 1902–1905 eruption was the world's deadliest eruption of the 20th century. *The Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015* [<https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2015/en/home/download.html>, last accessed August 1, 2024] indicates that Martinique is among the most vulnerable regions in the world to volcanic hazards given its insular context and the proportion of the population of the island living 30 km or less from this active volcano.

With the aim of documenting the ongoing volcanic unrest of Montagne Pelée since April 2019 and of providing a conceptual model for its origin, this study gathered a large collaborative group of various expertise, mainly at IPGP, to exploit the enormous amount of seismic, ground deformation, and geochemical data collected by the Observatoire Volcanologique et Sismologique de Martinique (OVSM-IPGP). The monitoring data was interpreted in the context of all the geological knowledge acquired by IPGP teams and collaborators on past eruptive activity at Montagne Pelée. The seismic network enabled the detection, classification, location, and energy assessment of earthquakes related to the volcanic activity. Additionally, numerical modelling of ground deformation data from Global Navigation Satellite System (GNSS) stations was conducted. Vegetation damage caused by gas emissions was monitored using the Normalized Difference Vegetation Index, and geochemical analyses, including isotopic content, of water and gas emissions were performed to complement the analysis.



Évolution du nombre mensuel de séismes volcaniques autour de la Montagne Pelée de janvier 2016 à décembre 2025 (histogrammes), pour différents types d'événements (première ligne : VT superficiels ; deuxième ligne : hybrides superficiels, longue période et trémors ; troisième ligne : hybrides et longue période profonds ($z > 10$ km)). Pour chaque catégorie, l'énergie cumulée (lignes bleues) est déduite de la magnitude des événements localisés. Noter que l'axe vertical est interrompu pour chaque catégorie afin d'illustrer l'augmentation marquée du nombre et de l'énergie de ces événements en 2025. Dernière ligne : évolution de la distance de base entre deux couples de stations GNSS (LAM0-CHNO et FDSC-LAM0), avec une référence commune fixée au 1^{er} mai 2021.

Evolution of the monthly count of volcanic earthquakes around Montagne Pelée from January 2016 to December 2025 (bars) for various type of events (first row : shallow VT events ; second row : shallow hybrid, long-period and tremor events ; third row : deep ($z > 10$ km) hybrid and long-period events) and, for each category, cumulated energy deduced from the magnitude of the localized events (blue lines). Note the broken vertical axis for each category with two different scales to display the large increase in numbers and energy of these events in 2025. Bottom row : evolution of the baseline between 2 couples of GNSS stations – LAM0-CHNO and FDSC-LAM0 - with a common reference on May, 1st 2021.

Depuis avril 2019, la Montagne Pelée présente divers signes de réactivation volcanique, notamment (Figure) :

- une augmentation de la sismicité volcano-tectonique (VT) superficielle (moins de 3 km sous le niveau de la mer), dépassant largement le taux mensuel de référence (19 VT/mois) ;
- quelques séismes hybrides superficiels (avec une coda enrichie en basses fréquences) et un trémor harmonique (signaux continus de basses fréquences durant plusieurs heures), enregistrés à la fin de l'année 2020 et associés à la circulation de fluides ;
- la survenue, à proximité de la Montagne Pelée, de séismes hybrides et de longue période profonds (plus de 15 km sous le niveau de la mer), souvent interprétés comme liés à la circulation ou au dégazage de fluides magmatiques profonds ;
- une déformation radiale limitée du sol, détectée à partir de mi-2021 par les stations GNSS du sommet, modélisée par une source d'inflation peu profonde située à environ 1 km sous et au sud-ouest du sommet ;
- une végétation dégradée ou morte, détectée depuis 2019 dans la zone des dernières éruptions phréatiques, associée à un dégazage passif accru de dioxyde de carbone dans les sols.

Since April 2019, Montagne Pelée volcano has displayed various signs of unrest, such as (Figure):

- increased shallow (< 3 km below sea level: bsl) volcano-tectonic (VT) seismicity (earthquakes occurring beneath or near the volcano with high-frequency signals), far exceeding the monthly reference rate (19 VT/month),
- some shallow hybrid earthquakes (earthquake with an enhanced low frequency coda) and a harmonic tremor (continuous low frequencies hours-long signals) recorded at the end of 2020 and associated to fluid circulation,
- the occurrence in the vicinity of Montagne Pelée of few deep (>15 km bsl) hybrid and long-period earthquakes, often interpreted as being associated with the circulation or degassing of deep magmatic fluids,
- limited radial ground deformation detected at summit GNSS stations from mid-2021, modelled by a shallow inflation source roughly 1 km beneath and southwest of the summit,
- degraded and dead vegetation detected since 2019 in the zone of the last phreatic eruptions, associated with elevated passive soil degassing of carbon dioxide.



Cette agitation prolongée résulterait probablement de la remontée de faibles volumes de fluides magmatiques profonds (gaz et/ou liquide), réactivant le système hydrothermal de la Montagne Pelée situé entre 0 et 3 km sous le niveau de la mer. L'ensemble de ces observations contribuera à l'évaluation de l'évolution de cette phase de réactivation vers une éruption magmatique ou phréatique.

Activité depuis la publication de l'article

L'étude publiée par l'équipe de l'OVSM-IPGP et ses collaborateurs (Fontaine *et al.*, 2025) couvrait une période allant jusqu'à juillet 2024. Depuis, l'activité de la Montagne Pelée avait d'abord diminué en termes de sismicité, de déformation et de superficie de végétation dégradée. Cependant, une recrudescence significative a été observée à partir de la fin avril 2025, marquée par un essaim de séismes hybrides et de longue période profonds ($17 < z < 40$ km), suivi quelques mois plus tard par une augmentation marquée de l'activité sismique superficielle au sein du système hydrothermal. Entre début août et fin octobre 2025, plus de 11 000 séismes VT et environ 300 séismes hybrides et de longue période ont été enregistrés, dont neuf événements dépassant une magnitude $M/v = 2,0$. Cette dernière crise sismique est probablement la plus importante à la Montagne Pelée depuis au moins 1985-1987 (Hirn *et al.*, 1987).

De plus, depuis septembre 2025, une reprise des déformations est à nouveau visible aux stations GNSS du sommet, toujours expliquée par une source de pression en haut du système hydro-thermal. La réactivation de la Montagne Pelée, initiée en 2019, se poursuit donc, et le niveau d'alerte reste maintenu au jaune (vigilance), en accord avec le plan ORSEC et la préfecture.

Pour plus d'informations sur l'activité récente de la Montagne Pelée, consulter le rapport annuel 2025 de l'OVSM-IPGP.

This protracted unrest likely results from the ascent of small volumes of deep magmatic fluids (gas and/or liquid), reactivating the hydrothermal system located between 0 and 3 km bsl beneath Montagne Pelée. All these observations will help to assess whether this unrest phase could lead to a phreatic eruption, and whether it could transition to a magmatic eruption.

Activity since the article was published

The study published by the OVSM-IPGP Team and colleagues (Fontaine *et al.*, 2025) covered a period up to July 2024. Since then, activity at Montagne Pelée had first decreased in terms of seismic activity, deformation, and surface area of degraded vegetation. The activity increased significantly again from the end of April 2025, starting with a swarm of deep ($17 < z < 40$ km) hybrid and long-period earthquakes, followed few months later by a significant increase of the seismic activity at shallow depth within the hydrothermal system. More than 11,000 VT and around 300 hybrid and long-period earthquakes occurred between early August and late October 2025, with nine events exceeding a magnitude $M/v = 2.0$. This latest seismic crisis is probably the most significant at Montagne Pelée since at least 1985-87 (Hirn *et al.*, 1987).

Moreover, since September 2025, a resumption of deformations at the summit GNSS stations is again visible and still explained by a source of pressure at the top of the hydrothermal system. The reactivation of Montagne Pelée that began in 2019 is therefore still ongoing, and the alert level is currently maintained at the yellow -vigilance- level in accordance with the ORSEC volcano alert and response plan under the authority of the Prefecture.

More information about the recent activity of Montagne Pelée can be found in the 2025 OVSM-IPGP annual report.

Ref : F. R. Fontaine, J.-C. Komorowski, J. Corbeau, A. Burtin, J.-B. de Chabalière, R. Grandin, J. M. Saurel, P. Agrinier, S. Moune, F. Jadelus, D. Melezan, J.-G. Gabriel, C. Vidal, B. Zimmermann, D. Vaton, J. Koziol, J. M. Lavenaire, R. Moretti, A. Lemarchand, T. Labasque, P.-H. Blard, B. Tibari, L. Zimmermann, C. Aubaud, J. Vergne, A. Andrieu, A. Filliaert, E. Chilin-Eusebe, S. Z. Wahlgren, M. Inostroza, J.-P. Métaxian, A. Potier, I. Fernandez, V. Robert, S. Deroussi, G. Carazzo, S. Tait, I. Vlastelic, D. E. Jessop, S. Bonaimé, A. Le Friant, M. Chaussidon, A. Michaud-Dubuy, L. Retailleau, A. Di Muro, P. Allard, C. Satriano. **Ongoing multiparameter unrest at the Montagne Pelée volcano on Martinique from 2019 to 2024.** Scientific Reports, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05641-6>

Contact : Jean-Christophe Komorowski - komorowski@ipgp.fr

#3

Nouveau traceur de l'impact du système hydrothermal sur la composition des gaz émis par la Soufrière de Guadeloupe

Tracing how the hydrothermal system impacts gas compositions at la Soufrière de Guadeloupe volcano

La surveillance des volcans repose principalement sur le suivi de la sismicité, la déformation du sol et la composition chimique des émissions de fluides volcaniques en surface. Sur les volcans à conduit ouvert, le suivi des concentrations et flux des espèces volatiles majeures (dioxyde de soufre SO_2 , dioxyde de carbone CO_2 , acide chlorhydrique HCl) dans les gaz volcaniques peut renseigner sur les conditions de stockage et de remontée du magma, et permettre la détection d'une future éruption. Cependant, les variations de compositions chimiques dans les gaz volcaniques émis en surface et, plus largement, les signaux géophysiques - sont bien plus compliquées à interpréter en présence d'un système hydrothermal. À la Soufrière de Guadeloupe où il pleut près de 7 m/an au sommet, les gaz qui s'échappent des réservoirs magmatiques en profondeur interagissent avec le système hydrothermal, un lieu de mélange entre fluides magmatiques ascendants et fluides de surface (eau de pluie ou eau de mer) s'infiltrant via le réseau de fractures. Ce processus, appelé « scrubbing », modifie donc la composition originelle des gaz, particulièrement pour les espèces solubles dans l'eau, comme le SO_2 ou le HCl . Pour isoler et caractériser l'évolution des apports d'origine purement magmatique dans le temps, il faut donc se doter de traceurs géochimiques permettant de décrypter ces interactions, encore difficiles à identifier et quantifier, ce qui constitue un verrou majeur pour le suivi de ce type de volcans.

Dans cette étude, des chercheuses et chercheurs de L'Institut de physique du globe de Paris ont utilisé pour la première fois les propriétés particulières du chlore et de ses isotopes stables ^{37}Cl et ^{35}Cl comme traceur des interactions gaz-liquide. Durant trois ans et demi, les compositions isotopiques en chlore ($\delta^{37}\text{Cl}$) de l'acide chlorhydrique HCl échantillonné mensuellement sur les fumeroles de la Soufrière par l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe (voir photo) ont été analysées au laboratoire de géochimie des isotopes stables de l'IPGP.

Volcano monitoring relies primarily on monitoring seismicity, ground deformation, and the chemical composition of emitted volcanic fluids. On open-conduit volcanoes, monitoring the concentrations and fluxes of major volatile species (sulfur dioxide SO_2 , carbon dioxide CO_2 , hydrochloric acid HCl) in volcanic gases can provide information on magma storage and ascent conditions, enabling the detection of a future eruption. However, variations in the chemical composition of volcanic gases emitted at the surface – and, more broadly, geophysical signals – are much more difficult to interpret in the presence of a hydrothermal system. At la Soufrière de Guadeloupe volcano, where nearly 7 meters of rain fall annually at the summit, the gases escaping from deep magma reservoirs interact with the hydrothermal system – a mixing zone where ascending magmatic fluids and surface fluids (rainwater or seawater) infiltrate through the fracture network. This process, known as “scrubbing,” therefore alters the original composition of the gases, particularly for water-soluble species such as SO_2 or HCl . To isolate and characterize the evolution of purely magmatic inputs over time, geochemical tracers are needed to decipher these interactions, which are still difficult to identify and quantify and represent a major obstacle to monitoring this type of volcano.

In this study, researchers from Institut de physique du globe de Paris used for the first time the specific properties of chlorine and its stable isotopes ^{37}Cl and ^{35}Cl as tracers of gas-liquid interactions. Over a period of three and a half years, the chlorine isotopic compositions ($\delta^{37}\text{Cl}$) of hydrochloric acid (HCl) sampled monthly from the fumaroles of la Soufrière de Guadeloupe by the Volcanological and Seismological Observatory (see photo) were analyzed at the stable isotope geochemistry laboratory in Paris.



Cette étude, focalisée sur les gaz fuméroliens, fait partie d'un plus large projet dédié à développer les fondements pour l'utilisation de ce traceur peu répandu en volcanologie, en utilisant ce « volcan laboratoire » qui permet la comparaison des mesures de $\delta^{37}\text{Cl}$ dans les gaz, sources thermales et lac acide aux multiples autres paramètres acquis en routine par l'Observatoire. Elle a pour objectif de mieux comprendre les grandes évolutions géochimiques observées dans les gaz depuis 2018 où l'activité hydrothermale sommitale de La Soufrière a considérablement augmenté, associée à un regain de la sismicité et à un fort enrichissement des gaz en acide chlorhydrique HCl (augmentation de 4 ordres de grandeur des concentrations en chlore [Cl]), générant un panache acide qui détruit la végétation ($1 \leq \text{pH} \leq 4$; <https://webobs.ovsg.univ-ag.fr>).

This study, which focuses on fumarolic gases, is part of a broader project aimed at laying the groundwork for the use of this new tracer—which is rarely employed in volcanology—by utilizing this “laboratory volcano,” which allows for the comparison of $\delta^{37}\text{Cl}$ measurements in gases, hot springs and acid lake with numerous other parameters routinely collected by the Observatory. The objective of the present study is to better understand the major changes observed in fumarolic gas compositions since 2018, when the summit hydrothermal activity at La Soufrière increased significantly, accompanied by renewed seismicity and a sharp enrichment of the gases in hydrochloric acid (HCl) (a four-order-of-magnitude increase in chlorine concentrations [Cl]), generating an acidic plume that destroys vegetation ($1 \leq \text{pH} \leq 4$; <https://webobs.ovsg.univ-ag.fr>).

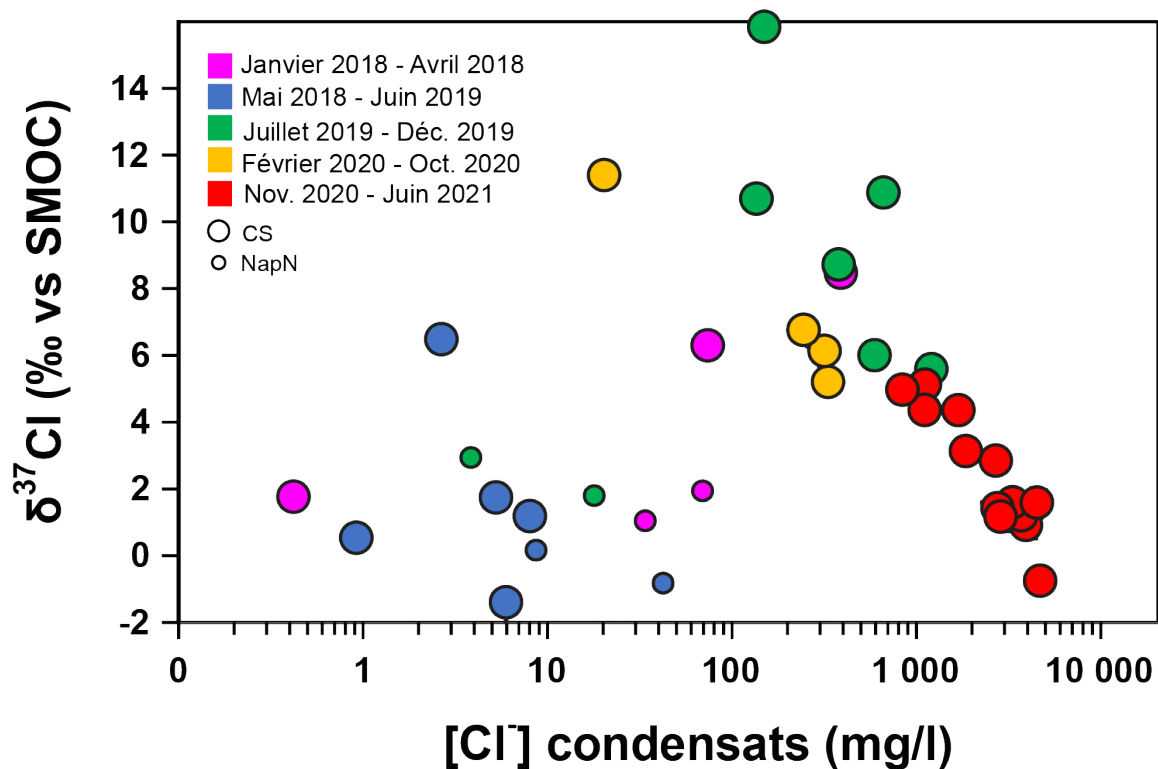


Magali Bonifacie échantillonnant la fumarole Cratère Sud au sommet de la Soufrière de Guadeloupe le 21 juin 2021. Depuis, le site est devenu inaccessible pour raisons de sécurité.

Magali Bonifacie sampling the Cratère Sud fumarole at the summit of La Soufrière de Guadeloupe on June 21, 2021. Since then, this site cannot be accessed anymore for safety reasons.

Les chercheuses et les chercheurs ont observé une forte anti-corrélation entre les concentrations en chlore des gaz et leurs compositions isotopiques pour les échantillons prélevés entre juillet 2019 et juin 2021 (Figure). Ils interprètent les valeurs de $\delta^{37}\text{Cl}$ les plus élevées comme associées à de grandes quantités de ^{35}Cl perdues via dissolution partielle du HCl gazeux, lors de sa circulation dans l'eau liquide en subsurface, probablement lors de sa remontée vers l'évent de la fumerole Cratère Sud. Ainsi, lorsque le HCl se dissout partiellement dans l'eau présente dans le dôme, l'isotope léger ^{35}Cl est dissout préférentiellement par rapport à l'isotope lourd ^{37}Cl , augmentant le rapport $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ (et donc les valeurs de $\delta^{37}\text{Cl}$) des gaz fumeroliens émis en surface. Par conséquent, plus la part de chlore perdue lors des interactions gaz-eau en subsurface est

The researchers observed a strong negative correlation between the chlorine concentrations in the gases and their isotopic compositions for samples collected between July 2019 and June 2021 (Figure). They interpret the highest $\delta^{37}\text{Cl}$ values as being associated with large amounts of ^{35}Cl lost through partial dissolution of gaseous HCl as it circulates in liquid water in the dome, likely during its ascent toward the Cratère Sud vent. Thus, when HCl partially dissolves in subsurface water, the lighter isotope ^{35}Cl is preferentially dissolved compared to the heavier isotope ^{37}Cl , increasing the $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ ratio (and therefore the $\delta^{37}\text{Cl}$ values) of the fumarolic gases collected at the vent. Consequently, the greater the proportion of chlorine lost during these subsurface gas-water interactions, the higher the $\delta^{37}\text{Cl}$ and the lower the HCl concentration in the fumaroles. Importantly,



Composition isotopique en chlore ($\delta^{37}\text{Cl}$ exprimée en pour mil en fonction du standard international d'eau de mer SMOC) en fonction de la concentration en chlore [Cl] des condensats de gaz (comprenant la totalité de l'acide chlorhydrique gazeux émis à l'évent) prélevés sur la fumerole Cratère Sud (CS) entre janvier 2018 et juin 2021. À partir de juillet 2019, les valeurs de $\delta^{37}\text{Cl}$ des gaz diminuent au cours du temps et sont anti-corrélées aux [Cl]. Les condensats les plus riches en Cl sont associés aux $\delta^{37}\text{Cl}$ les plus bas et proches des $\delta^{37}\text{Cl}$ attendus pour le HCl le plus primitif (ex., d'origine magmatique). Inversement, les $\delta^{37}\text{Cl}$ les plus hauts sont plus dispersés mais toujours associés aux [Cl] les plus bas, suggérant un processus associé à la perte de chlore léger ^{35}Cl à partir d'une source constante. Le seul processus connu pour favoriser la perte de l'isotope léger ^{35}Cl , et donc qui peut expliquer cette anti-corrélation, est la dissolution partielle de HCl gazeux dans l'eau. Les faibles [Cl] et $\delta^{37}\text{Cl}$ sur la fumerole Cratère Sud entre mai 2018 et juin 2019 indiquent que la circulation des gaz à travers l'édifice a été momentanément modifiée à la suite du séisme de magnitude 4.1 le 27 avril 2018, en concordance avec l'endommagement mécanique du dôme observé par les données sismologiques.

Isotopic composition of chlorine ($\delta^{37}\text{Cl}$ expressed in per mil and relative to the international seawater standard SMOC) versus the chlorine content [Cl] of gas condensates (including all the emitted volcanic hydrochloric acid) collected from the Cratère Sud (CS) fumarole between January 2018 and June 2021. Starting in July 2019, the $\delta^{37}\text{Cl}$ values of the emitted HCl decrease over time and are negatively correlated with their [Cl]. The Cl-richest condensates are associated with the lowest $\delta^{37}\text{Cl}$ values and are close to the $\delta^{37}\text{Cl}$ values expected for the most primitive HCl (e.g., for a magmatic origin). Conversely, the highest $\delta^{37}\text{Cl}$ values are more dispersed but systematically associated with the lowest [Cl], suggesting a process involving the loss of the light chlorine isotopes ^{35}Cl from a constant source. The only known process that promotes ^{35}Cl loss, and thus that can explain this anti-corrélation, is the partial dissolution of gaseous HCl in water. The low [Cl] and $\delta^{37}\text{Cl}$ values at the Cratère Sud fumarole between May 2018 and June 2019 indicate that gas circulation through the edifice was temporarily altered following the magnitude 4.1 earthquake on April 27, 2018, consistent with the mechanical damage to the dome observed in seismological data.



importante, plus le $\delta^{37}\text{Cl}$ est élevé et la concentration en HCl dans les fumeroles est faible. Les données $[\text{Cl}]-\delta^{37}\text{Cl}$ montrent également un assèchement progressif du trajet des gaz à Cratère Sud entre juillet 2019 et juin 2021, avec en fin de période, les gaz les plus riches en Cl associés aux $\delta^{37}\text{Cl}$ les plus bas, et proches des $\delta^{37}\text{Cl}$ attendus pour le HCl le plus primitif. L'étude compare ces résultats avec, d'une part les variations d'apports de gaz magmatiques et/ou de chaleur, tracées par le rapport CO_2/CH_4 dans la fumerole, et d'autre part le niveau de l'eau dans l'aquifère sommital, modélisé à partir de la pluviométrie observée. Ces comparaisons suggèrent que l'intensité des interactions entre gaz et eau liquide dans le dôme de La Soufrière est contrôlée, au premier ordre, par l'apport de chaleur et/ou de gaz magmatiques au système hydrothermal (ie., une dominance du forçage interne).

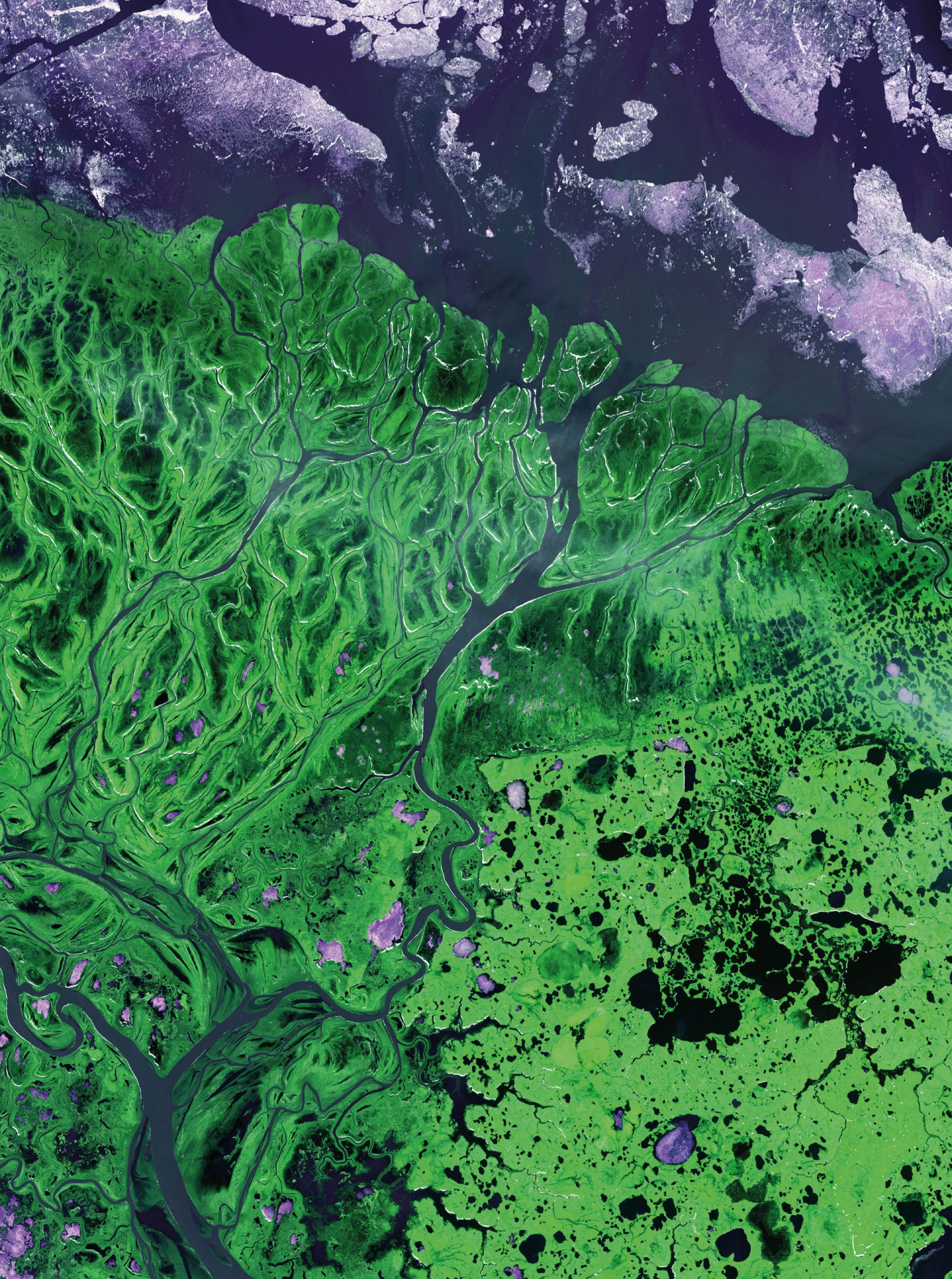
Les contraintes apportées par ces données de $\delta^{37}\text{Cl}$ sur Cratère Sud ont constitué les premières évidences fortes, maintenant renforcées par d'autres observations (e.g., augmentation des températures : proches de 100°C avant janvier 2021, et dépassant les 150°C à partir de 2023) de l'assèchement progressif du trajet des gaz émis le long de la fracture Cratère Sud. Une perspective intéressante, qui pourrait rentrer dans la routine de suivi des gaz, serait de déployer cette caractérisation isotopique aux autres zones fumeroliennes sommitales de la Soufrière pour suivre plus finement l'évolution géographique et temporelle des interactions liquide-gaz dans le dôme. Cette approche pourrait par exemple permettre de déterminer si le système hydrothermal évolue localement, avec un déplacement simple d'activité, ou si l'ensemble du système évolue en réponse à un forçage magmatique plus profond. Plus généralement, ces travaux constituent une première dans l'utilisation du $\delta^{37}\text{Cl}$ fumerolien comme index du processus de dissolution partielle des gaz volcaniques, avec une possibilité de quantification de ce processus si les conditions initiales sont connues (par exemple par l'étude des $\delta^{37}\text{Cl}$ des inclusions vitreuses).

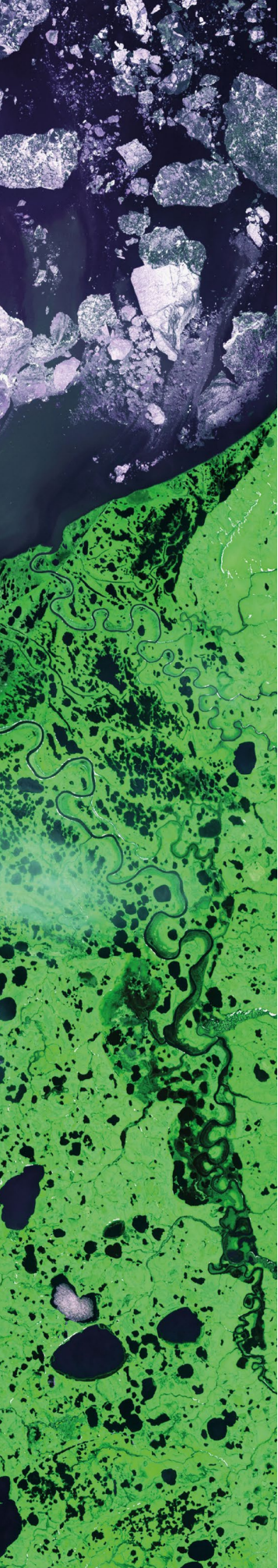
the paired $[\text{Cl}]-\delta^{37}\text{Cl}$ data also show a gradual drying of the gas pathway at Cratère Sud between July 2019 and June 2021, for which the gases with the highest Cl content also have the lowest $\delta^{37}\text{Cl}$ values, which are close to the $\delta^{37}\text{Cl}$ values expected for the most primitive HCl. The study compares these results with, on the one hand, variations in magmatic gas and/or heat input, as indicated by the CO_2/CH_4 ratio in the fumarole, and on the other hand, the water level in the summit aquifer, modeled based on observed rainfall. These comparisons suggest that the intensity of interactions between gas and liquid water in the dome of la Soufrière is controlled, primarily, by the input of heat and/or magmatic gases into the hydrothermal system (i.e., a dominance of internal forcing).

The constraints provided by these $\delta^{37}\text{Cl}$ data on the Cratère Sud constituted the first strong evidence, now reinforced by other observations (e.g., rising temperatures: close to 100°C before January 2021, and exceeding 150°C starting in 2023) of the gradual drying out of the gas pathway along the Cratère Sud fracture. An interesting prospect, which could be incorporated into routine gas monitoring, would be to apply this isotopic tracer to other summit fumarolic zones of La Soufrière to track the geographical and temporal evolution of liquid-gas interactions within the dome. This approach could, for example, help determine whether the hydrothermal system is evolving locally, with a simple shift in activity, or whether the entire system is evolving in response to deeper magmatic forcing. More generally, this work represents the first use of fumarolic $\delta^{37}\text{Cl}$ as an index of the partial dissolution process of volcanic gases, with the potential to quantify this process when the initial $\delta^{37}\text{Cl}$ values are known (for example, through the study of melt inclusions).

Ref : Le Glas E., Bonifacie M., Moretti R., Robert V., Agrinier P., Labidi J., Bardoux G., Pantobe L., Burtin A., Chillin-Eusebe E., Didier T., Inostroza M. **Progressive drying of the hydrothermal system of La Soufrière de Guadeloupe (French West Indies) revealed by multi-year monitoring of chlorine isotopic composition of fumarolic HCl**, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2025.108306>

Contact : Magali Bonifacie - bonifaci@ipgp.fr





Système Terre

Earth system science

Le thème Système Terre s'attache à comprendre les interactions entre les enveloppes externes de notre planète (lithosphère, hydrosphère, biosphère et atmosphère), et par extension des corps célestes du système solaire. Ces milieux, qui mélangent organismes vivants, air, eau et roches, sont le théâtre de transformations chimiques, de réactions biologiques et de flux d'énergie et de matière. Ils jouent un rôle environnemental majeur dans l'évolution des surfaces, notamment la zone critique, définie comme la couche la plus externe de notre planète s'étendant de la base des aquifères au sommet de la couche limite atmosphérique. En concentrant la plupart des activités humaines, la zone critique est sujette à des changements rapides et profonds affectant les organismes vivants et leur environnement.

En 2025, trois études illustrent ces recherches. La première explore les écosystèmes profonds des aquifères basaltiques d'Islande et met en évidence des communautés microbiennes interagissant avec les roches, contribuant à l'altération des silicates et au stockage du carbone. La deuxième analyse le transport des colloïdes et nanoparticules dans les systèmes fluviaux, montrant l'influence des régimes hydrologiques et de l'usage des sols sur leur distribution et le transfert des contaminants vers les océans. Enfin, une troisième étude examine les réseaux fluviaux de méthane sur Titan, dont la géométrie suit des lois physiques analogues à celles observées sur Terre.

The Earth System theme focuses on understanding the interactions between the planet's outer layers—the lithosphere, hydrosphere, biosphere, and atmosphere—and, by extension, those of other celestial bodies in the Solar System. These environments, which combine living organisms, air, water, and rock, are sites of chemical transformations, biological reactions, and flows of energy and matter. They play a key environmental role in shaping planetary surfaces, particularly within the critical zone—the outermost layer of Earth, extending from the base of aquifers to the top of the atmospheric boundary layer. As the primary host of human activity, the critical zone is undergoing rapid and profound changes that impact both ecosystems and their environments.

In 2025, three studies illustrate this research. The first explores deep ecosystems within Iceland's basaltic aquifers, highlighting microbial communities that interact with rocks and contribute to silicate weathering and carbon storage. The second analyzes the transport of colloids and nanoparticles in river systems, showing how hydrological regimes and land use influence their distribution and the transfer of contaminants to the oceans. Finally, a third study examines methane river networks on Titan, whose geometry follows physical laws analogous to those observed on Earth.

#1

Comment les écosystèmes du sous-sol façonnent et sont façonnés par la réactivité des basaltes

How subsurface ecosystems shape and are shaped by basalt reactivity

Une équipe de géochimistes, géobiologistes et de microbiologistes d'ISTerre (CNRS/Université Grenoble Alpes), de l'IPGP et de l'Université d'Islande a exploré la vie microbienne enfouie à plusieurs centaines voire milliers de mètres dans les roches basaltiques d'Islande, au cœur de ses aquifères géothermiques. Ces environnements extrêmes, où la température dépasse parfois 100°C, abritent une étonnante diversité microbienne dont le rôle reste encore largement méconnu.

Grâce à des analyses basées sur le séquençage de l'ADN environnemental, les chercheurs ont dressé un inventaire des communautés bactériennes et archéennes qui colonisent ces eaux souterraines sur un ensemble de 22 puits répartis dans la partie occidentale de l'Islande. Ils ont révélé des assemblages dominés par des micro-organismes chimio-lithotrophes et thermophiles – capables de tirer leur énergie des roches et des composés inorganiques – qui pourraient activement participer à l'altération chimique des basaltes et au stockage du carbone.

Ces résultats constituent une avancée pour la conception de microcosmes expérimentaux destinés à reproduire les interactions entre micro-organismes, minéraux et fluides dans les conditions de la subsurface profonde. Identifier les taxons emblématiques de ces milieux, c'est-à-dire les espèces les plus représentatives et métaboliquement actives, permettra de concevoir des expériences plus pertinentes pour étudier la dissolution des silicates et les processus de piégeage du CO₂ dans les formations basaltiques.

Au-delà des enjeux climatiques, ces écosystèmes souterrains offrent une fenêtre unique sur les limites de la vie en milieu extrême, comparables à celles qui auraient pu exister sur la Terre primitive – ou même dans le sous-sol de Mars.

A team of geochemists, geobiologists, and microbiologists from ISTerre (CNRS/Université Grenoble Alpes), IPGP and University of Iceland explored microbial life buried hundreds, even thousands, of meters within the basaltic rocks of Iceland, at the heart of its geothermal aquifers. These extreme environments, where temperatures sometimes exceed 100 °C, host an astonishing microbial diversity whose role remains largely unknown.

Using analyses based on environmental DNA sequencing, the researchers compiled an inventory of the bacterial and archaeal communities colonizing these groundwater systems across 22 wells in western Iceland. They identified assemblages dominated by chemo-lithotrophic and thermophilic microorganisms—capable of deriving energy from rocks and inorganic compounds—that could actively contribute to basalt weathering and carbon storage.

These findings represent a significant step forward in designing experimental microcosms aimed at reproducing interactions between microorganisms, minerals, and fluids under deep subsurface conditions. Identifying the emblematic taxa of these environments—that is, the most representative and metabolically active species—will enable more relevant experiments to study silicate dissolution and CO₂ trapping processes in basaltic formations.

Beyond climate-related implications, these underground ecosystems offer a unique window into the limits of life in extreme conditions, comparable to those that may have existed on early Earth—or even in the subsurface of Mars.

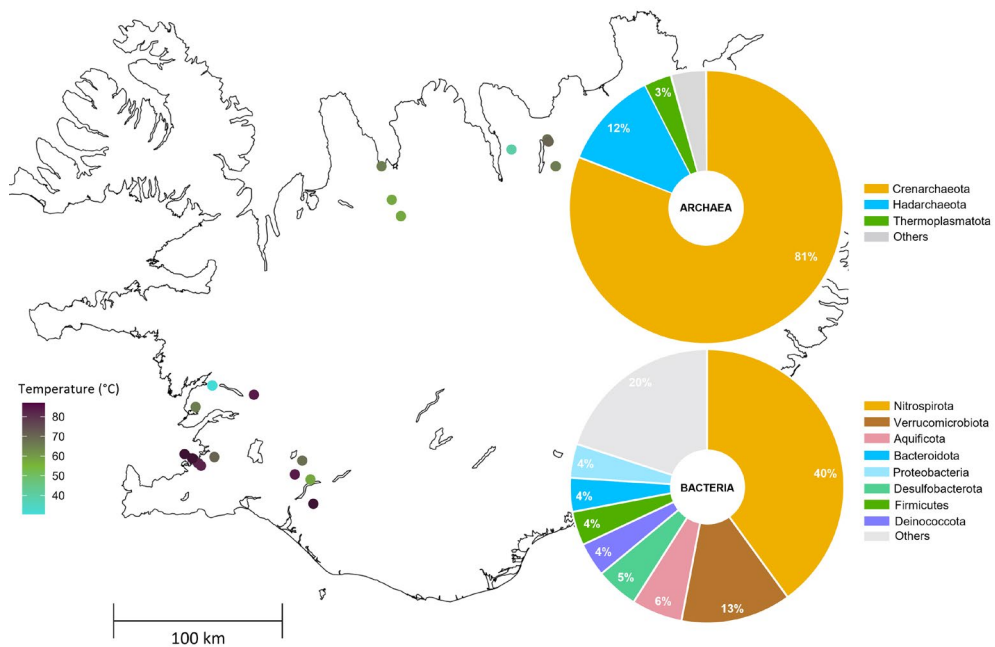


Cette étude ouvre ainsi la voie à une meilleure compréhension du rôle des microbes dans les cycles biogéochimiques profonds, et fournit un cadre expérimental précieux pour explorer comment la vie interagit avec les minéraux, depuis les profondeurs terrestres jusqu'aux environnements planétaires.

Ce travail a été financé par la subvention ERC-2020-COG Mobidic 101001275 accordée à D. Daval (ISterre).

This study thus paves the way for a better understanding of the role of microbes in deep biogeochemical cycles and provides a valuable experimental framework for exploring how life interacts with minerals, from Earth's depths to planetary environments.

This work was funded by the grant ERC-2020-COG Mobidic 101001275 awarded to D. Daval (ISterre).



En étudiant 22 puits géothermiques en Islande, les chercheurs ont montré que la température, le pH et la réactivité de la roche déterminent fortement les communautés microbiennes. Ces résultats éclairent les facteurs clés de la vie souterraine et aident à concevoir des expériences sur l'altération des silicates.

Researchers studying 22 Icelandic geothermal wells found that temperature, pH, and rock reactivity strongly shape microbial communities. The work highlights key controls on subsurface life and helps guide experiments on silicate weathering.

Ref : Bas-Lorillot, J., Ménez, B., Wild, B., Borrel, G., Le Bihan, M., Stefánsson, A., Gunnarsson-Robin, J., Bjarkadóttir, A. B., Aðalsteinsdóttir, S. M., Tisserand, D., Daval, D., Gérard, E. (2025) **Groundwater microbial diversity associated with Icelandic basaltic subsurface environments.** *Environmental Microbiology Reports*. doi : 10.1111/1758-2229.

Contacts : E. Gérard, B. Ménez (IPGP) | Equipe LOMs, thèmes : ESS & Origins - menez@ipgp.fr



#2

Traquer l'invisible : comment les nanoparticules voyagent à travers les rivières

Tracking the invisible : how nanoparticles travel through rivers

Dans le cadre du Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'eau et l'environnement du bassin de la Seine (PIREN-Seine) et en collaboration avec des chercheurs de l'Université de Reims, des chercheurs de l'IPGP proposent une analyse innovante du transport des colloïdes et nanoparticules dans les systèmes fluviaux tempérés. Cette étude révèle comment les régimes hydrologiques et l'utilisation des sols influencent la distribution, la composition et les flux des colloïdes dans le bassin de la Seine.

Les colloïdes, incluant les nanoparticules (≤ 100 nm de diamètre), jouent un rôle actif dans le transport des contaminants en milieu aquatique. Ces particules ne se contentent pas d'être passivement transportées par les cours d'eau ; elles constituent des vecteurs efficaces pour les métaux et les contaminants organiques, influençant ainsi directement les flux d'éléments exportés vers les océans.

Une méthodologie analytique avancée, développée récemment à l'IPGP, permet de caractériser ces interactions fines entre hydrologie, géochimie et dynamique particulaire. Elle intègre la spectrométrie de masse en temps de vol à source plasma (spICP-TOFMS) pour l'analyse multi-élémentaire particule par particule, et exploite, en complément des analyses directes de l'eau, un bioindicateur connu, la moule zébrée *Dreissena polymorpha*.

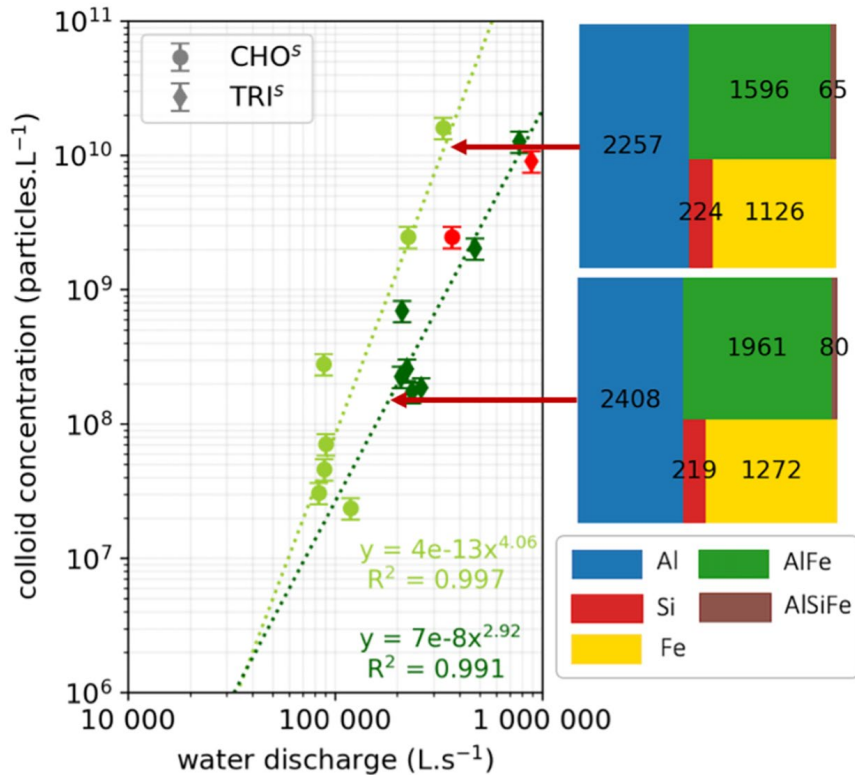
Cette approche permet de cerner l'influence du débit des rivières sur le transport colloïdal dans les systèmes fluviaux, avec une augmentation des concentrations en colloïdes avec le débit, suivant une loi de puissance. Elle met aussi en évidence que des éléments tels que l'aluminium, le silicium et le fer dominent la composition chimique des colloïdes et nanoparticules (Figure 1). Les distributions géochimiques à l'échelle du bassin versant permettent d'expliquer la formation et la variabilité spatiale de populations particulières distinctes, notamment les argiles, les carbonates et les oxydes de fer. Cette approche permet également d'expliquer les mécanismes à l'origine du mélange conservatif des colloïdes aux confluences, en l'absence d'agrégation, de dissolution ou de transformation significative. En effet, la similarité chimique entre la Seine et ses principaux affluents (la Marne et l'Oise) favorise ce mélange conservatif des fractions colloïdales.

Within the framework of the Interdisciplinary Research Program on Water and Environment of the Seine Basin (PIREN-Seine) and in collaboration with researchers from the University of Reims, researchers from IPGP propose an innovative analysis of colloid and nanoparticle transport in temperate river systems. This study reveals how hydrological regimes and land use influence the distribution, composition, and fluxes of colloids in the Seine basin.

Colloids, including nanoparticles (≤ 100 nm in diameter), play an active role in contaminant transport in aquatic environments. These particles are not simply passively transported by watercourses; they constitute effective vectors for metals and organic contaminants, thus directly influencing the fluxes of elements exported to the oceans.

An advanced analytical methodology, recently developed at IPGP, enables the characterization of these fine interactions between hydrology, geochemistry, and particle dynamics. It integrates time-of-flight inductively coupled plasma mass spectrometry (spICP-TOFMS) for particle-by-particle multi-elemental analysis, and uses, in addition to direct water analyses, a known bioindicator, the zebra mussel *Dreissena polymorpha*.

This approach allows capturing the influence of river discharge on colloidal transport in river systems, with an increase in colloid concentrations with discharge, following a power law. It also highlights that elements such as aluminum, silicon, and iron dominate the chemical composition of colloids and nanoparticles (Figure 1). Geochemical distributions at the watershed scale help explain the formation and spatial variability of distinct particle populations, notably clays, carbonates, and iron oxides. This approach also enables explaining the mechanisms underlying conservative mixing of colloids at confluences, in the absence of significant aggregation, dissolution, or transformation. Indeed, the chemical similarity between the Seine and its main tributaries (the Marne and the Oise) promotes this conservative mixing of colloidal fractions.

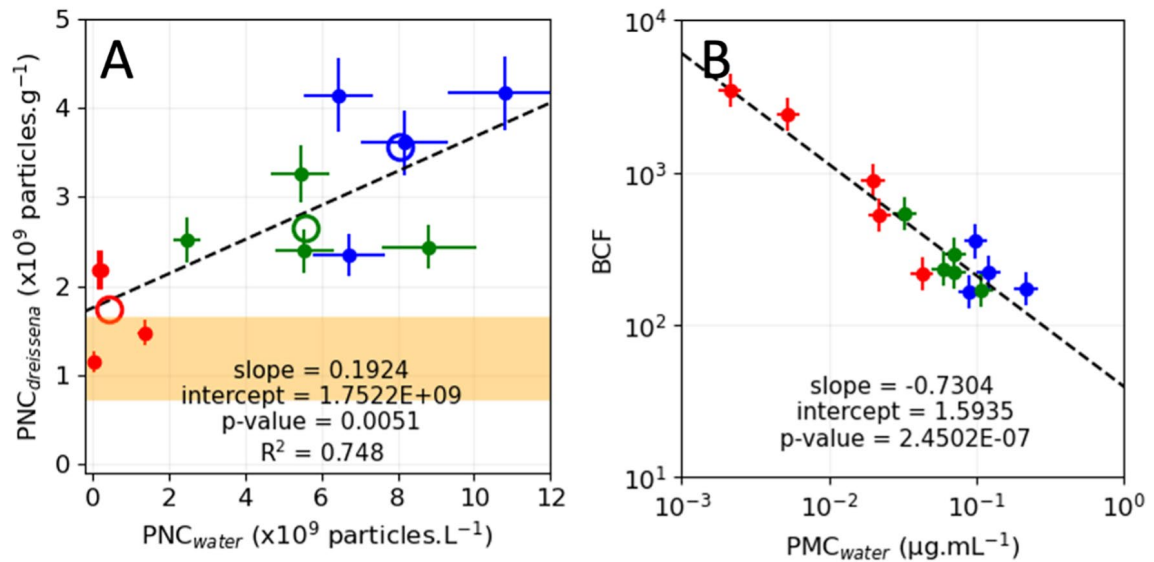


Concentration en colloïdes par rapport au débit d'eau (à gauche) et distribution relative des groupes en fonction de la concentration moyenne en colloïdes ($\times 10^6$ particules.L $^{-1}$) (à droite) pour l'eau prélevée en amont (CHO 5) et en aval (TRI 5) de la Seine. Les groupes sont désignés en fonction de leur composition élémentaire globale, bien qu'il existe des variations dans les proportions élémentaires au sein des groupes.

Colloid concentration versus water discharge (left) and cluster relative distribution according to the average colloid number concentration ($\times 10^6$ particles.L $^{-1}$) (right) for water collected in the upstream (CHO 5) and downstream (TRI 5) parts of the Seine river. The clusters are designated based on their overall elemental composition, although variations in elemental ratios exist within clusters.

Ce travail constitue une avancée majeure en fournissant une base mécanistique pour l'intégration de la bioaccumulation dans les modèles de transport particulaire. La bioaccumulation chez la *Dreissena polymorpha* s'avère proportionnelle à l'exposition environnementale, avec des facteurs de bioconcentration compris entre 10 et 10 000 selon le type de particule (Figure 2). Dans la mesure où les taux d'export des colloïdes – estimés entre 2 et 54 kg.an $^{-1}$.km $^{-2}$ en ne considérant que l'aluminium, le silicium et le fer – sont fortement influencés par l'occupation des sols et les pratiques agricoles, en particulier dans le bassin de la Marne, le recours à un bioindicateur pourrait permettre de mieux anticiper les évolutions de la qualité de l'eau, des flux de contaminants et des réponses hydrochimiques des bassins versants aux activités agricoles, à l'urbanisation et aux événements hydrologiques extrêmes.

This work represents a major advance by providing a mechanistic basis for integrating bioaccumulation into particle transport models. Bioaccumulation in *Dreissena polymorpha* proves proportional to environmental exposure, with bioconcentration factors ranging from 10 to 10,000 depending on particle type (Figure 2). Since colloid export rates – estimated between 2 and 54 kg.y $^{-1}$.km $^{-2}$ considering only aluminum, silicon, and iron – are strongly influenced by land use and agricultural practices, particularly in the Marne basin, the use of a bioindicator could enable better anticipation of changes in water quality, contaminant fluxes, and hydrochemical responses of watersheds to agricultural activities, urbanization, and extreme hydrological events.



A : Concentration en nombre de particules dans Dreissena ($PNC_{dreissena}$) par rapport à la concentration moyenne en nombre de particules dans l'eau de rivière pendant la période de déploiement (PNC_{water}). Les cercles correspondent aux valeurs moyennes pour chaque campagne. La bande orange correspond à la concentration moyenne en nombre de particules de la population témoin. B : Facteur de bioconcentration (BCF) en fonction de la concentration massique en NPs (PMC_{water}). Dans les deux graphiques, les points rouges, bleus et verts correspondent respectivement aux campagnes 2020, 2021 et 2023.

A : Particle number concentration in Dreissena ($PNC_{dreissena}$) versus average particle number concentration in river water during the deployment period (PNC_{water}). The circles correspond to the average values for each campaign. The orange band corresponds to the average control population particle number concentration. B : Bioconcentration factor (BCF) as a function of NPs concentration in water (PMC_{water}). In both panels, the red, blue and green points correspond to the 2020, 2021 and 2023 campaigns respectively.

Ref : Wang, Francine, Mickaël Tharaud, Antonio Moreda Piñeiro, and Marc F. Benedetti.

Colloidal and nanoparticle transport in a temperate river system : Hydrological controls and geochemical signatures in the Seine Basin. *Chemical Geology* (2025); 123025.

Origine des crédits : programme PIREN Seine.

Contacts : Mickaël Tharaud et Marc Benedetti (Equipe ACE) - benedetti@ipgp.fr



#3

Les rivières de Titan : des lois physiques similaires à celles de la Terre

The rivers of Titan: physical laws similar to those on Earth

Des chercheur.euse.s de L'Institut de physique du globe de Paris (Université Paris Cité/ CNRS/ IPGP) ont démontré pour la première fois que les rivières de Titan, la plus grande lune de Saturne, suivent les mêmes lois physiques que celles de la Terre. Leurs travaux, publiés dans la revue *Geophysical Research Letters*, montrent que la théorie du seuil, utilisée pour étudier les rivières terrestres, peut être appliquée aux rivières extraterrestres. Grâce à cette approche, ils ont pu estimer le débit des rivières de Titan et en déduire les taux de précipitations de méthane. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour l'étude du climat et des rivières de Titan.

Titan est l'un des rares corps du Système solaire, avec la Terre, à posséder des rivières actives façonnant son paysage. Cependant, sur cette lune glacée, ce n'est pas l'eau qui coule dans les lits fluviaux, mais du méthane liquide. Ce dernier, soumis à un cycle météorologique similaire à celui de l'eau sur Terre, s'évapore, se condense en nuages, puis retombe sous forme de précipitations. Ce processus façonne la surface de Titan en creusant des vallées et des réseaux fluviaux qui s'étendent sur des centaines de kilomètres.

Dans cette étude, les chercheur.euse.s ont analysé des images optiques fournies par la caméra DISR (Descent Imaging and Spectro-Radiometer) de la sonde Huygens pour étudier une rivière proche de l'équateur, ainsi que des données de l'imager SAR (Cassini Synthetic Aperture Radar) à bord de Cassini pour une rivière située au pôle sud. En utilisant des modèles analytiques issus de l'hydraulique terrestre, ils ont démontré que la relation entre la largeur, la pente et le débit des rivières suit une loi similaire à celle observée sur Terre. Jusqu'à présent, ces relations n'avaient jamais été testées au-delà de notre planète.

Researchers from the Institut de physique du globe de Paris (Université Paris Cité/CNRS/IPGP) have demonstrated for the first time that the rivers of Titan, Saturn's largest moon, follow the same physical laws as those on Earth. Their work, published in the journal *Geophysical Research Letters*, shows that the threshold theory, used to study terrestrial rivers, can be applied to extraterrestrial rivers. Through this approach, they were able to estimate the flow rate of Titan's rivers and deduce the methane precipitation rates. These results open new perspectives for the study of Titan's climate and rivers.

Titan is one of the few bodies in the Solar System, along with Earth, to possess active rivers shaping its landscape. However, on this icy moon, it is not water that flows in the riverbeds, but liquid methane. The latter, subject to a meteorological cycle similar to that of water on Earth, evaporates, condenses into clouds, and then falls as precipitation. This process shapes Titan's surface by carving valleys and fluvial networks that extend for hundreds of kilometers.

In this study, researchers analyzed optical images provided by the DISR (Descent Imaging and Spectro-Radiometer) camera of the Huygens probe to study a river near the equator, as well as data from the SAR imager (Cassini Synthetic Aperture Radar) on board Cassini for a river located at the south pole. Using analytical models from terrestrial hydraulics, they demonstrated that the relationship between the width, slope, and flow rate of the rivers follows a law similar to that observed on Earth. Until now, these relationships had never been tested beyond our planet.



Vue d'artiste de rivières de méthane sur Titan : sous son atmosphère dense, les pluies de méthane érodent la surface et sculptent des réseaux fluviaux à toutes les latitudes.

Artist's impression of methane rivers on Titan: beneath its dense atmosphere, methane rainfall erodes the surface and carves river networks at all latitudes with geometry depending on local precipitation rates.

Vers une meilleure compréhension des processus géophysiques universels

Ces travaux confirment que les lois qui régissent l'écoulement des rivières et l'érosion sur Terre peuvent être appliquées à des environnements extraterrestres, même sous des conditions gravitationnelles, géologiques et atmosphériques très différentes. Ils offrent ainsi une nouvelle clé pour comprendre comment les paysages planétaires évoluent dans le temps et comment les climats extraterrestres fonctionnent.

L'une des principales applications de ces résultats concerne l'estimation des taux de précipitations de méthane sur Titan. En reliant la géométrie des rivières à leur débit, les scientifiques peuvent déduire la quantité de méthane liquide qui s'écoule à la surface et mieux comprendre le cycle hydrologique de cette lune. Cela permettra de préciser la fréquence et l'intensité des pluies de méthane, encore mal connues.

Towards a better understanding of universal geophysical processes

This work confirms that the laws governing river flow and erosion on Earth can be applied to extraterrestrial environments, even under very different gravitational, geological, and atmospheric conditions. It thus provides a new key to understanding how planetary landscapes evolve over time and how extraterrestrial climates function.

One of the main applications of these results concerns the estimation of methane precipitation rates on Titan. By linking the geometry of the rivers to their flow rate, scientists can deduce the amount of liquid methane flowing on the surface and better understand the hydrological cycle of this moon. This will help to specify the frequency and intensity of methane rains, which are still poorly understood.

Cette étude ouvre également des perspectives pour l'exploration future d'autres mondes présentant des signes d'écoulements liquides en surface, comme Mars. Titan, avec son épaisse atmosphère et son cycle hydrologique unique, reste l'un des mondes les plus fascinants du Système solaire et un candidat de premier plan pour la recherche de processus similaires à ceux de la Terre.

Dragonfly : une mission clé pour affiner ces résultats

Les perspectives futures pour l'étude des rivières de Titan sont prometteuses, notamment grâce à la mission Dragonfly, qui devrait atteindre Titan au milieu des années 2030. Ce drone autonome, développé par la NASA, explorera plusieurs régions de la surface de Titan près de l'équateur et collectera des données inédites.

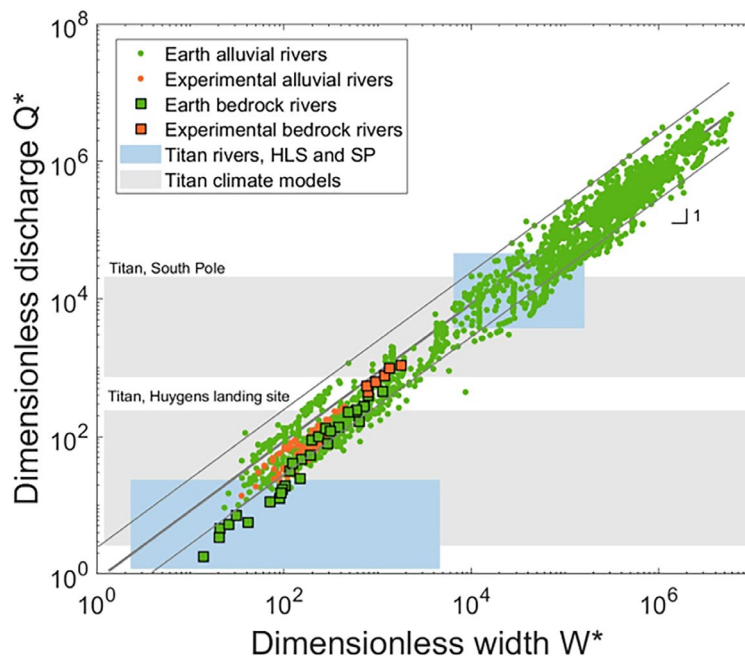
Dragonfly fournira des mesures *in situ* essentielles, notamment la taille et la densité des grains de sédiments présents dans les lits des rivières, ainsi que des informations détaillées sur la largeur des canaux. Ces observations permettront de valider les modèles actuels et d'améliorer la précision des estimations de débit et de précipitations.

This study also opens perspectives for the future exploration of other worlds showing signs of liquid flows on their surface, such as Mars. Titan, with its thick atmosphere and unique hydrological cycle, remains one of the most fascinating worlds in the Solar System and a prime candidate for the search for processes similar to those on Earth.

Dragonfly : a key mission to refine these results

The future prospects for the study of Titan's rivers are promising, particularly thanks to the Dragonfly mission, which is expected to reach Titan in the mid-2030s. This autonomous drone, developed by NASA, will explore several regions of Titan's surface near the equator and collect unprecedented data.

Dragonfly will provide essential *in situ* measurements, including the size and density of sediment grains present in the riverbeds, as well as detailed information on the width of the channels. These observations will validate current models and improve the accuracy of flow rate and precipitation estimates.



Débit adimensionné des rivières terrestres et de Titan en fonction de leur largeur adimensionnée. Les (~2600) points correspondent aux rivières alluviales et les (~35) carrés aux rivières rocheuses. Les points orange correspondent aux données de laboratoire, tandis que les points verts correspondent aux rivières naturelles. La droite grise épaisse suit la théorie du seuil. Les régions bleues représentent le débit estimé sur deux sites de Titan avec leurs incertitudes pour l'équateur (HLS) et le pôle sud. Les deux bandes grisées représentent les estimations de débit calculées à partir des taux de précipitations prédits par les modèles climatiques pour les deux sites étudiés.

Dimensionless discharge of terrestrial and Titan rivers as a function of their dimensionless width. The (~2600) points represent alluvial rivers and the (~35) squares bedrock rivers. The orange points represent laboratory data, while the green points represent natural rivers. The thick gray line represents the threshold theory. The blue areas represent the estimated discharge with their uncertainties at two sites on Titan, for the equator (HLS) and the south pole. The two gray bands represent discharge estimates calculated from precipitation rates predicted by climate models for the two sites studied.



En plus des perspectives offertes par cette étude, la contribution française, dirigée par le Laboratoire Atmosphères et Observations Spatiales « LATMOS » (CNRS, Sorbonne Université et Université Versailles Saint-Quentin) comprend le développement du système DraMS-GC, un chromatographe en phase gazeuse intégré à l'instrument DraMS. Cet ensemble permettra d'analyser la composition chimique d'échantillons de surface et d'atmosphère, avec pour objectif de détecter une variété de composés organiques et d'éventuelles biosignatures.

Des implications pour la modélisation du climat de Titan

Cette étude souligne l'importance de disposer de modèles numériques de terrain (DTM) à haute résolution pour mesurer avec précision les pentes des rivières de Titan, ainsi que d'images à haute résolution pour déterminer la largeur des canaux. À ce jour, la plupart des modèles disponibles manquent de résolution, limitant ainsi la précision des estimations de débit. Aussi, les chercheurs estiment que leur approche pourrait être étendue à d'autres régions où des canaux fluviaux sont visibles sur les images radar (SAR).

In addition to the perspectives offered by this study, the French contribution, led by the Laboratoire Atmosphères et Observations Spatiales "LATMOS" (CNRS, Sorbonne Université, and Université Versailles Saint-Quentin), includes the development of the DraMS-GC system, a gas chromatograph integrated into the DraMS instrument. This system will analyze the chemical composition of surface and atmospheric samples, with the aim of detecting a variety of organic compounds and potential biosignatures.

Implications for Titan's climate modeling

This study highlights the importance of having high-resolution digital terrain models (DTMs) to accurately measure the slopes of Titan's rivers, as well as high-resolution images to determine the width of the channels. To date, most available models lack resolution, thus limiting the accuracy of flow rate estimates. Furthermore, the researchers estimate that their approach could be extended to other regions where fluvial channels are visible on radar images (SAR).

Ref : Daudon, C., Rodriguez, S., Lajeunesse, E., Lucas, A., & Jacquemoud, S. (2025). **Inferring discharge from river geometry on Titan.** *Geophysical Research Letters*, 52(8), e2024GL111912.

Crédits de recherche : Authors acknowledge financial support by LabEx UnivEarthS (ANR-10-LABX-0023 and ANR-18-IDEX-0001). They also thank the Centre National d'Etudes Spatiales for its financial support.

Contacts : Rodriguez, S., Lucas, A., & Jacquemoud, S. (équipe PSS), Lajeunesse, E (IPGP - équipe DFG) - rodriguez@ipgp.fr





Origines Origins

Les planètes du Système solaire présentent des compositions et structures particulièrement variées, aux origines encore largement débattues. L'étude des processus primordiaux et des mécanismes d'évolution planétaire s'avère essentielle pour comprendre la dynamique de formation, la composition et l'évolution de ces astres, mais également la chimie prébiotique et les conditions environnementales relatives au développement des premiers organismes vivants sur Terre, voire sur d'autres planètes et exoplanètes. L'IPGP est l'un des rares établissements où des scientifiques de multiples domaines de recherche tels que la géologie, la planétologie, la géochimie, la cosmochimie, la géophysique, la géobiologie et l'astrophysique peuvent travailler ensemble sur le décryptage de ces questions fondamentales.

En 2025, trois études illustrent ces approches. La première analyse les gaz rares dans des inclusions de quartz archéens pour reconstituer l'atmosphère primitive, révélant un dégazage intense du manteau et une perte vers l'espace avant le Grand Événement d'Oxydation. La deuxième éclaire l'origine de la roche d'Akilia (Groenland), dont les signatures isotopiques confirment l'existence d'océans précoces et de cycles chimiques actifs. Enfin, une troisième étude propose une avancée méthodologique pour détecter des biosignatures dans les carbonates, grâce à un protocole Rock-Eval modifié distinguant composés organiques biotiques et abiotiques, ouvrant de nouvelles perspectives pour l'exploration de Mars et des lunes glacées.

The planets of the Solar System exhibit highly diverse compositions and structures, whose origins remain the subject of ongoing debate. Studying the primordial processes and planetary evolution mechanisms is essential to understanding how they influenced the dynamics of planetary formation, composition, and evolution, as well as prebiotic chemistry and the environmental conditions that led to the emergence of the first living organisms on Earth and potentially on other planets and exoplanets. The IPGP is one of the few institutions where scientists from a wide range of fields: geology, planetology, geochemistry, cosmochemistry, geophysics, geobiology, and astrophysics can work together to unravel these fundamental questions.

In 2025, three studies illustrate these approaches. The first analyzes noble gases trapped in Archean quartz inclusions to reconstruct the composition of the early atmosphere, revealing intense mantle degassing and a loss of gases to space prior to the Great Oxidation Event. The second sheds light on the origin of the Akilia rock (Greenland), whose isotopic signatures confirm the existence of early oceans and active chemical cycles. Finally, a third study introduces a methodological advance for detecting biosignatures in carbonates, through a modified Rock-Eval protocol that distinguishes between biotic and abiotic organic compounds, opening new perspectives for the exploration of Mars and icy moons.

#1

Comprendre l'évolution de l'atmosphère terrestre grâce aux archives minérales de l'Archéen

Understanding the evolution of Earth's atmosphere through Archean mineral archives

Comprendre l'évolution de l'atmosphère terrestre sur des temps géologiques très longs constitue un enjeu majeur pour retracer l'histoire de la Terre et les conditions qui ont permis l'émergence et l'évolution de la vie. Si l'atmosphère actuelle est relativement bien caractérisée, les processus qui ont contrôlé sa composition durant les premiers milliards d'années de l'histoire de la planète demeurent encore imparfaitement contraints. Parmi eux, deux mécanismes fondamentaux jouent un rôle central : le dégazage du manteau vers la surface et l'échappement des gaz atmosphériques vers l'espace.

Une étude récente menée dans le cadre de la thèse de Félix Vayrac à l'Institut de physique du globe de Paris, sous la direction de Guillaume Avice – lauréat de l'ERC Starting Grant ATTRACTE – apporte de nouvelles contraintes sur ces processus clés. Les chercheurs se sont appuyés sur l'analyse isotopique de gaz rares piégés dans des inclusions fluides au sein de cristaux de quartz hydrothermaux provenant d'Afrique du Sud et d'Australie. Ces minéraux, formés il y a environ 3,3 et 2,7 milliards d'années, constituent de véritables capsules temporelles capables de préserver des traces de la composition de l'atmosphère primitive.

Les analyses isotopiques des gaz rares révèlent notamment un rapport isotopique du néon significativement plus faible que celui observé aujourd'hui dans l'atmosphère. Ce signal témoigne d'un dégazage particulièrement intense du manteau terrestre durant l'Archéen, période marquée par une activité géodynamique vigoureuse et un transfert important de volatils vers la surface.

L'étude met également en évidence une concentration en xénon atmosphérique environ deux fois supérieure à celle mesurée aujourd'hui. Ce résultat indique qu'une part importante de ce gaz noble s'est progressivement échappée vers l'espace au cours du temps géologique, confirmant que l'atmosphère terrestre primitive a subi une perte significative de certains éléments volatils.

Understanding the evolution of Earth's atmosphere over geological timescales is essential for reconstructing the planet's history and the conditions that enabled the emergence and development of life. While the present-day atmosphere is well characterized, the processes that controlled its composition during the first billions of years of Earth's history remain only partially constrained. Two key mechanisms are particularly critical: degassing from the mantle to the surface and the escape of atmospheric gases into space.

A recent study conducted at the Institut de physique du globe de Paris as part of Félix Vayrac's PhD, supervised by Guillaume Avice – recipient of the ERC Starting Grant ATTRACTE – provides new insights into these fundamental processes. The research relies on isotopic analyses of noble gases trapped in fluid inclusions within hydrothermal quartz crystals collected in South Africa and Australia. Formed approximately 3.3 and 2.7 billion years ago, these minerals act as remarkable time capsules preserving information about the composition of the primitive atmosphere.

The isotopic measurements reveal a neon isotopic ratio significantly lower than that observed in today's atmosphere. This signature indicates intense degassing of the early mantle during the Archean eon, a period characterized by vigorous geodynamic activity and substantial transfer of volatiles from Earth's interior to its surface.

The study also shows that atmospheric xenon concentrations were roughly twice as high as those measured today. This finding indicates that a significant fraction of xenon has gradually escaped to space over geological time, confirming that the primitive atmosphere experienced substantial loss of certain volatile elements.



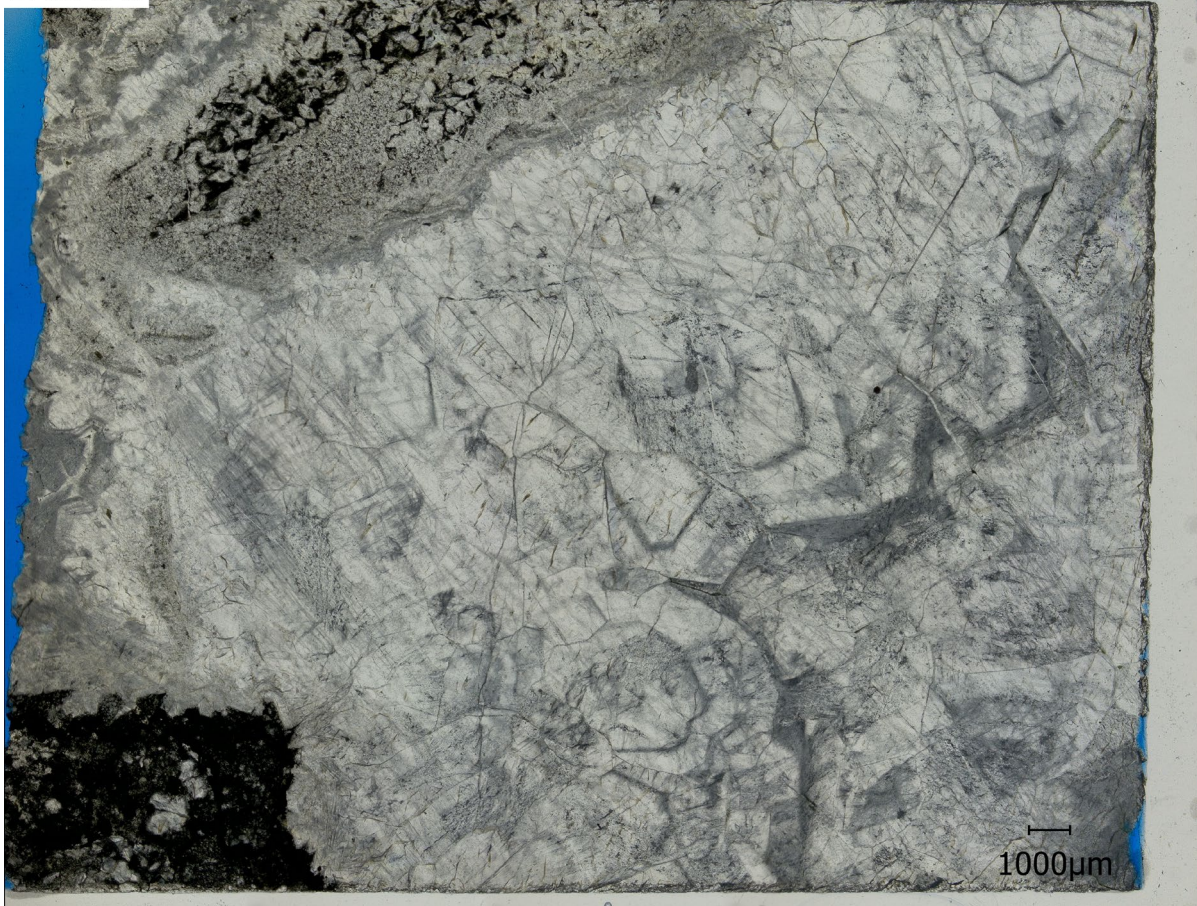
Ces nouvelles données offrent un éclairage inédit sur l'état de l'atmosphère terrestre avant le Grand Événement d'Oxydation, survenu il y a environ 2,3 milliards d'années, lorsque l'oxygène produit par les organismes photosynthétiques a commencé à s'accumuler durablement dans l'atmosphère. En combinant géochimie isotopique, pétrologie et étude des inclusions fluides, ce travail contribue à mieux comprendre les interactions entre l'intérieur de la Terre, l'atmosphère et l'environnement de surface aux premiers temps de l'histoire de la planète.

Au-delà de l'histoire de notre planète, ces résultats participent également aux recherches visant à comprendre l'évolution des atmosphères planétaires et les conditions d'habitabilité des planètes rocheuses.

These new data provide valuable insights into the state of Earth's atmosphere prior to the Great Oxidation Event, which occurred around 2.3 billion years ago, when oxygen produced by photosynthetic organisms began to accumulate permanently in the atmosphere. By combining isotopic geochemistry, petrology and the study of fluid inclusions, this work helps refine our understanding of the interactions between Earth's interior, the atmosphere and surface environments during the earliest stages of planetary history.

Beyond the reconstruction of Earth's past, these findings also contribute to broader research on the evolution of planetary atmospheres and the conditions that may support habitability on rocky planets.

BMGA3-3



Inclusions fluides dans des quartz âgés de 2.7 milliards d'années.
Fluid inclusions in 2.7-billion-year-old quartz.

Ref : Vayrac, F., Avice, G., J.Zhang, X., Parai, R., Philippot, P. (2025). **Records of mantle geodynamics and atmospheric escape in Archean quartz.** *Science Advances*, 11, eaea3380. doi :10.1126/sciadv.aea3380

Contact : Félix Vayrac - vayrac@ipgp.fr

#2

La roche d'Akilia : un témoin des premiers océans terrestres

The Akilia rock: a witness to earth's earliest oceans

Comprendre les environnements présents à la surface de la Terre il y a plus de 3,5 milliards d'années est essentiel pour retracer l'histoire précoce de la planète et les conditions ayant permis l'apparition de la vie. Parmi les rares archives géologiques de cette époque lointaine figure la célèbre roche d'Akilia, au Groenland, âgée de plus de 3,6 milliards d'années. Depuis plusieurs décennies, sa nature exacte fait l'objet d'un débat scientifique : s'agit-il d'une roche d'origine magmatique profondément modifiée ou d'un ancien sédiment formé dans un environnement océanique primitif ?

Une étude menée dans le cadre de la thèse de Zheng-Yu Long à l'Institut de physique du globe de Paris, sous la direction de Frédéric Moynier, apporte un éclairage décisif sur cette question. Les chercheurs ont analysé la composition isotopique du potassium dans la roche d'Akilia, une approche géochimique particulièrement sensible aux processus de formation et d'altération des roches.

Understanding the environments that existed at Earth's surface more than 3.5 billion years ago is essential for reconstructing the planet's earliest history and the conditions that may have enabled the emergence of life. Among the rare geological archives from this remote period is the famous Akilia rock from Greenland, dated at more than 3.6 billion years old. For decades, its nature has been the subject of intense scientific debate: is it a deeply altered magmatic rock, or an ancient sediment formed in a primitive ocean?

A study conducted at the Institut de physique du globe de Paris as part of Zheng-Yu Long's PhD, under the supervision of Frédéric Moynier, provides decisive new insight into this long-standing question. The researchers analyzed the potassium isotopic composition of the Akilia rock, a geochemical approach that is highly sensitive to rock formation and alteration processes.



Affleurement sur l'île d'Akilia (Groenland) où se trouve certaines des plus anciennes traces de sédiments terrestres. © Mark Van Zuilen

Outcrop on Akilia Island (Greenland), home to some of the oldest known traces of terrestrial sediments. © Mark Van Zuilen



Les résultats révèlent une signature isotopique du potassium relativement lourde, associée à une faible teneur globale en cet élément. Cette combinaison correspond aux caractéristiques typiques de sédiments chimiques formés en milieu marin, résultant de la précipitation de matériaux dissous dans l'eau de mer. Ces observations suggèrent que la roche d'Akilia pourrait provenir d'un dépôt sédimentaire ancien formé dans un océan primitif, avant d'être transformé ultérieurement par des processus métasomatiques impliquant la circulation de fluides dans la croûte terrestre.

Cette interprétation renforce l'hypothèse selon laquelle des océans existaient déjà à la surface de la Terre durant l'Éoarchéen, il y a plus de 3,6 milliards d'années. La roche d'Akilia constituerait ainsi l'un des plus anciens témoins connus d'un environnement sédimentaire marin sur notre planète.

Au-delà de la résolution d'un débat géologique ancien, ces résultats apportent de nouvelles contraintes sur les conditions de surface de la Terre primitive et sur les cycles chimiques qui structuraient déjà les interactions entre océans, croûte et atmosphère. Ces environnements pourraient avoir joué un rôle déterminant dans l'émergence des premières formes de vie.

En mobilisant la géochimie isotopique pour revisiter l'une des archives les plus anciennes de la planète, cette étude illustre la capacité des approches analytiques modernes à renouveler notre compréhension des premières étapes de l'histoire terrestre.

The results reveal a relatively heavy potassium isotopic signature combined with a low overall potassium content. This combination is characteristic of chemical sediments formed in marine environments, produced through the precipitation of dissolved material from seawater. These observations suggest that the Akilia rock may originate from an ancient sedimentary deposit formed in a primitive ocean, later modified by metasomatic processes involving fluid circulation within the Earth's crust.

This interpretation strengthens the hypothesis that oceans already existed at Earth's surface during the Eoarchean, more than 3.6 billion years ago. The Akilia rock would therefore represent one of the oldest known witnesses of a marine sedimentary environment on our planet.

Beyond resolving a long-standing geological debate, these findings provide new constraints on the surface conditions of the early Earth and on the chemical cycles that structured interactions between oceans, crust and atmosphere. Such environments may have played a key role in the emergence of the earliest forms of life.

By applying isotopic geochemistry to revisit one of the oldest geological archives on Earth, this study demonstrates how modern analytical approaches can profoundly refine our understanding of the planet's earliest history.

Ref : Long, Z.-Y., Moynier, F., Dai, W., van Zuilen, M., Deng, J., & Qiu, K.-F. (2025). **Revisiting the Eoarchean Akilia quartz-pyroxene rock with potassium isotopes : Implications for early-ocean sedimentation.**

Proceedings of the National Academy of Sciences, 122(31), e2510228122, <https://doi.org/10.1073/pnas.2510228122>

Contact : Frédéric Moynier - moynier@ipgp.fr

#3

Identifier les traces de vie dans les carbonates : une nouvelle méthode pour l'astrobiologie

Tracking biosignatures in carbonates: a new method for astrobiology

Les carbonates constituent des archives précieuses de l'histoire géologique et biologique de la Terre. Lors de leur formation, ces minéraux peuvent piéger des composés organiques provenant de leur environnement, qu'ils soient issus de processus purement géochimiques ou liés à l'activité de micro-organismes. Distinguer ces deux origines – biogénique ou abiotique – représente toutefois un défi majeur pour les chercheurs, en particulier dans le contexte de la recherche de traces de vie ancienne sur Terre ou sur d'autres planètes.

Une étude menée dans le cadre de la thèse d'Alexandra Perron à l'Institut de physique du globe de Paris, sous la direction de Bénédicte Ménez et de Fabien Stalport (Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques, LISA), en collaboration avec l'ISTeP, propose une avancée méthodologique importante pour relever ce défi. Les chercheurs ont développé un protocole analytique innovant basé sur une adaptation de la méthode Rock-Eval, largement utilisée en géochimie pour caractériser la matière organique dans les roches sédimentaires.

Cette approche modifiée s'inspire directement des instruments embarqués sur certaines missions planétaires de la NASA et de l'Agence spatiale européenne (ESA). Elle repose sur des cycles de chauffage successifs réalisés sous atmosphère d'air puis d'azote, permettant de différencier les composés organiques adsorbés à la surface des minéraux de ceux véritablement piégés dans le réseau cristallin des carbonates.

L'application de cette méthode à plus de soixante échantillons de carbonates naturels et synthétiques a permis d'identifier des signatures gazeuses distinctes selon leur mode de formation. Les carbonates influencés par l'activité biologique présentent notamment des profils d'émission de gaz différents de ceux formés uniquement par des processus géochimiques.

Carbonates represent valuable archives of Earth's geological and biological history. During their formation, these minerals can trap organic compounds from their environment, whether produced by purely geochemical processes or influenced by microbial activity. Distinguishing between these two origins – biogenic or abiotic – remains a major challenge, particularly in the context of searching for evidence of ancient life on Earth and potentially on other planetary bodies.

A study conducted at the Institut de physique du globe de Paris as part of Alexandra Perron's PhD, supervised by Bénédicte Ménez and Fabien Stalport (Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques, LISA), in collaboration with ISTeP, presents a significant methodological advance to address this challenge. The researchers developed an innovative analytical protocol based on a modified Rock-Eval method, widely used in geochemistry to characterize organic matter in sedimentary rocks.

This modified approach is inspired by instruments deployed on planetary missions operated by NASA and the European Space Agency (ESA). It relies on successive heating cycles performed under air and nitrogen atmospheres, enabling researchers to distinguish between organic compounds adsorbed on mineral surfaces and those truly trapped within the carbonate crystal lattice.

Applying this method to more than sixty natural and synthetic carbonate samples revealed distinct gas emission signatures depending on their formation processes. Carbonates influenced by biological activity display gas release patterns that differ from those produced solely through abiotic geochemical processes.

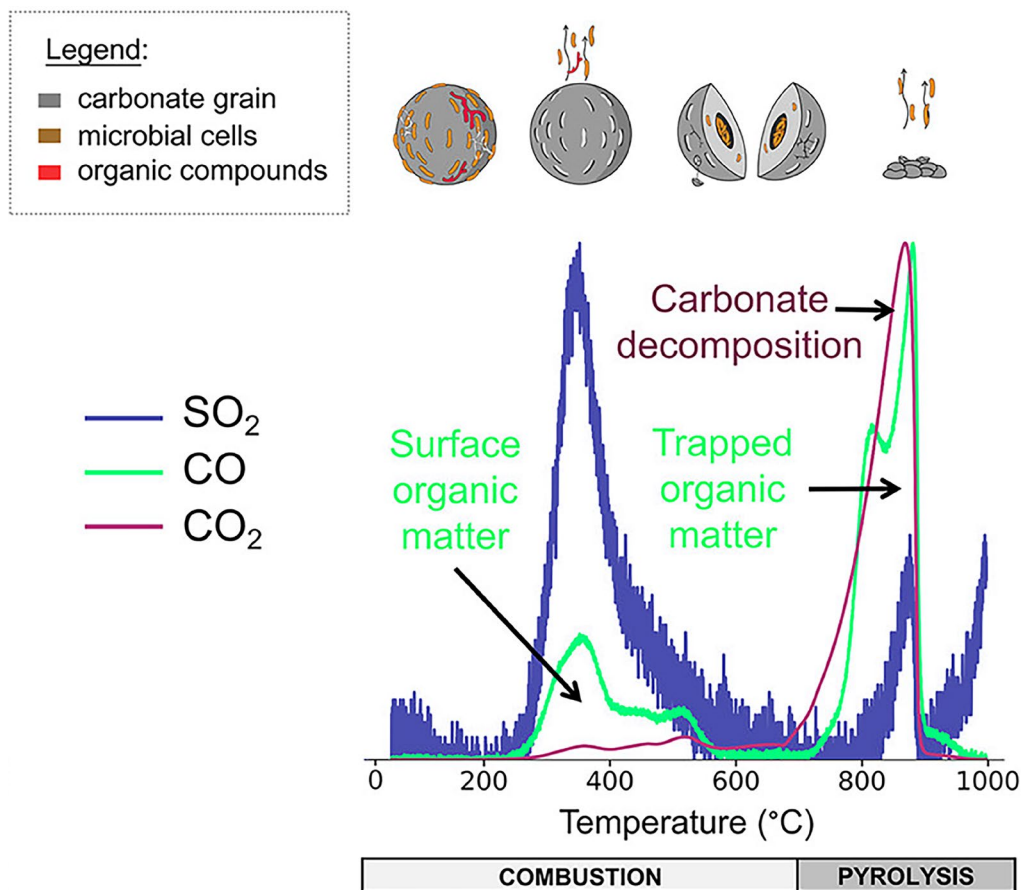


Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour la recherche de biosignatures dans les archives géologiques terrestres, mais aussi dans les matériaux provenant d'autres corps planétaires. La méthode développée pourrait ainsi contribuer à l'interprétation des analyses réalisées lors des futures missions d'exploration astrobiologique, notamment sur Mars ou sur certaines lunes glacées du Système solaire susceptibles d'abriter ou d'avoir abrité des environnements propices à la vie.

En combinant géochimie analytique et perspectives d'exploration planétaire, cette étude illustre le rôle croissant des sciences de la Terre dans la recherche de traces de vie au-delà de notre planète.

These findings open new perspectives for the detection of biosignatures in Earth's geological record, as well as in materials originating from other planetary bodies. The method could therefore contribute to the interpretation of analyses carried out during future astrobiological exploration missions, particularly on Mars and on icy moons of the Solar System that may have hosted environments favorable to life.

By combining analytical geochemistry with planetary exploration perspectives, this study highlights the growing role of Earth sciences in the search for traces of life beyond our planet.



La décomposition thermique d'un bio-carbonate libère les organiques de surface (vert), puis les organiques piégés dans le réseau (vert) avant le pic carbonaté principal (violet), permettant de différencier composés organiques de surface et internes pour la détection de biosignatures.

Thermal decomposition of a bio-carbonate releases surface organics (green), then lattice-trapped organics (green) before the main carbonate peak (purple), allowing differentiation of surface and internal organic compounds for biosignature detection.

Ref : Perron, A., Ménez, B., Baudin, F., & Stalport, F. (2025). **A modified Rock-Eval approach to track organics in (bio) carbonates.** *Chemical Geology*, 690, 122815. doi : 10.1016/j.chemgeo.2025.122815.

Contact : Bénédicte Menez - menez@ipgp.fr



Bilan DD&RSE 2025 de l'IPGP

IPGP 2025 sustainability and social responsibility report (SD&SR)

En 2025, l'IPGP a poursuivi sa dynamique en matière de développement durable et de responsabilité sociétale, en mobilisant ses équipes et en consolidant ses actions autour des axes stratégiques du schéma directeur DD&RSE.

Sur le plan de l'engagement et de la citoyenneté, l'Institut a renforcé sa mission de formation et de sensibilisation. L'enseignement a intégré des initiatives phares, telles que l'UE obligatoire en Licence *Transition Écologique pour un Développement Soutenable* (TEDS), ainsi que la création d'un nouvel itinéraire de Master en Géosciences pour l'Anthropocène. Ce parcours interdisciplinaire vise à former des experts capables d'appréhender les interactions complexes entre la Terre et les sociétés humaines, et à préparer les étudiants à relever les défis environnementaux actuels et futurs. Parallèlement, la recherche s'est orientée vers des projets responsables et ouverts sur la société, avec des initiatives comme *Écorc'Air*, permettant de mesurer les polluants métalliques déposés par l'activité urbaine de manière participative. L'IPGP a également contribué à la sensibilisation sociétale lors de la Fête de la Science, accueillant de nombreux visiteurs sur ses sites pour promouvoir la compréhension des risques environnementaux.

En 2025, la formation et la sensibilisation des personnels ont été renforcées, avec notamment la présentation de la première évaluation de l'empreinte carbone de l'IPGP. Celle-ci s'élève à 5190 ± 964 t eqCO₂ soit $11,2 \pm 2,1$ t eCO₂ par personne pour l'année 2023 et 5230 ± 1500 t eqCO₂ soit $10,8 \pm 3,1$ t eCO₂ par personne pour l'année 2024. Dans cette dynamique, l'IPGP s'apprête à se doter d'un plan de transition.

Dans le domaine des pratiques écoresponsables, l'Institut a développé une politique d'achats engagée, incluant l'usage de produits ménagers éco-responsables, des clauses favorisant les circuits courts et le tri des déchets dans la restauration, ainsi que le recyclage systématique des consommables techniques par les prestataires. L'IPGP a également renforcé l'économie circulaire grâce au recyclage des équipements informatiques, des piles et du papier, et par le recours à des achats d'occasion via la bourse au matériel CNRS.

In 2025, IPGP continued to strengthen its commitment to sustainable development and social responsibility, mobilizing its teams and consolidating its actions around the strategic priorities defined in its SD&SR roadmap.

In terms of engagement and citizenship, the Institute further reinforced its mission in education and public outreach. Teaching programs incorporated key initiatives, such as the compulsory undergraduate course *Ecological Transition for Sustainable Development* (TEDS), as well as the creation of a new Master's track in Geosciences for the Anthropocene. This interdisciplinary program aims to train experts capable of addressing the complex interactions between the Earth and human societies, and to prepare students to tackle current and future environmental challenges. At the same time, research activities increasingly focused on responsible, society-oriented projects, including initiatives such as *Écorc'Air*, which enables participatory monitoring of metal pollutants deposited by urban activity. IPGP also contributed to public awareness during the Fête de la Science, welcoming numerous visitors across its sites to promote a better understanding of environmental hazards.

In 2025, staff training and awareness efforts were strengthened, notably through the presentation of the first assessment of the Institut de Physique du Globe de Paris carbon footprint. This was estimated at $5,190 \pm 964$ tCO₂e, corresponding to 11.2 ± 2.1 tCO₂e per person for 2023, and $5,230 \pm 1,500$ tCO₂e, corresponding to 10.8 ± 3.1 tCO₂e per person for 2024. As part of this momentum, the IPGP is preparing to adopt a transition plan.

In the area of environmentally responsible practices, the Institute developed a proactive procurement policy, including the use of eco-friendly cleaning products, the integration of short supply chains and waste sorting in catering services, and the systematic recycling of technical consumables by service providers. IPGP also strengthened its circular economy approach through the recycling of IT equipment, batteries, and paper, and by promoting second-hand purchases via the CNRS equipment exchange platform.



Concernant l'efficacité énergétique et les mobilités durables, des efforts significatifs ont été menés sur le bâtiment principal du site Cuvier, avec un état des lieux précis des postes énergétiques, l'utilisation d'outils de suivi avancés et des optimisations techniques, permettant de réduire la facture énergétique de plusieurs milliers d'euros. Des initiatives complémentaires ont été menées sur le site de Chambon-la-Forêt, avec l'installation d'une pompe à chaleur et l'isolation des bâtiments, et l'IPGP a favorisé la mobilité durable par l'augmentation des places de stationnement pour vélos et l'encouragement aux déplacements partagés pour les conférences internationales.

Regarding energy efficiency and sustainable mobility, significant efforts were made at the main building on the Cuvier site, including a detailed assessment of energy uses, the deployment of advanced monitoring tools, and technical optimizations, leading to a reduction in energy costs of several thousand euros. Additional initiatives were implemented at the Chambon-la-Forêt site, including the installation of a heat pump and improved building insulation. IPGP also encouraged sustainable mobility by increasing bicycle parking capacity and promoting shared travel for international conferences.

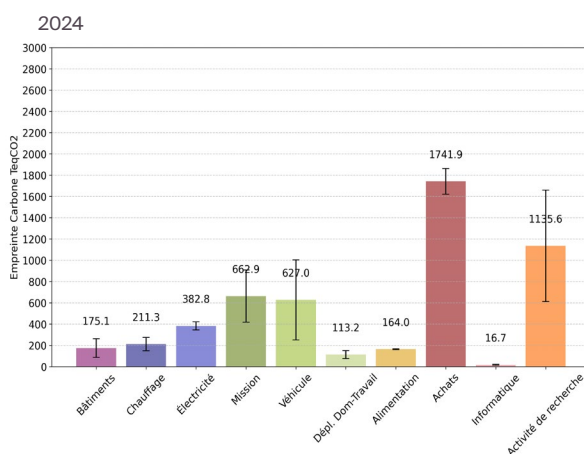
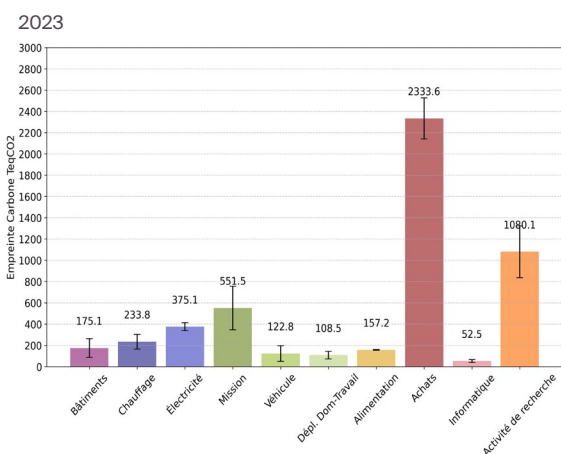
Enfin, l'IPGP a contribué à l'amélioration de la qualité de vie universitaire, en mettant en œuvre le HRS4R pour renforcer la cohésion et l'égalité au sein du laboratoire, et en renouvelant la convention avec Sorbonne Université pour l'accès aux installations sportives, offrant à plus de cent étudiants et agents la possibilité de maintenir un équilibre entre vie personnelle et professionnelle.

Finally, IPGP contributed to improving quality of life within the academic community by implementing the HRS4R framework to strengthen cohesion and equality within the laboratory, and by renewing its agreement with Sorbonne Université for access to sports facilities, enabling more than one hundred students and staff members to maintain a healthy work-life balance.

Ces initiatives illustrent la capacité de l'IPGP à intégrer le DD&RSE dans sa gouvernance, sa recherche, ses pratiques et la vie quotidienne de son personnel et de ses étudiants, et témoignent d'un engagement concret en 2025, en cohérence avec les orientations de l'Université Paris Cité.

These initiatives demonstrate IPGP's ability to integrate sustainable development and social responsibility into its governance, research, operational practices, and daily life, reflecting a concrete and sustained commitment in 2025, in line with the strategic orientations of Université Paris Cité.

Estimation de l'empreinte carbone pour les années 2023 et 2024 (exprimée en tonnes équivalente CO₂)
Estimated carbon footprint for 2023 and 2024 (expressed in tonnes of CO₂ equivalent)



L'empreinte carbone de l'établissement est calculée en additionnant les émissions liées aux bâtiments, au chauffage, à l'électricité, aux déplacements professionnels (missions et véhicules), aux trajets domicile-travail, à l'alimentation, aux achats (équipements hors informatique, consommables, services), à l'informatique, ainsi qu'aux activités de recherche (calcul intensif externalisé et spatial).

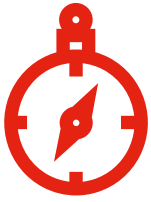
The institution's carbon footprint is calculated by aggregating emissions related to buildings, heating, electricity consumption, business travel (missions and vehicles), commuting, food services, procurement (non-IT equipment, consumables, and services), IT infrastructure, as well as research activities (externalized high-performance computing and space-related activities).





Observatoires

Observatories



Observatoires magnétiques Magnetic observatories

Le service des observatoires magnétiques de l'IPGP fournit des observations au sol du champ magnétique terrestre ainsi que des produits dérivés. Il fait partie du Bureau Central de Magnétisme Terrestre (BCMT) qui est un Service National d'Observation (SNO) du CNRS-INSU géré par l'IPGP, auquel participe aussi le service d'observation magnétique de l'EOST à Strasbourg. L'IPGP maintient les réseaux de stations de variations et de répétition français, ainsi que dix observatoires en collaboration avec des institutions françaises et internationales : l'observatoire magnétique national de Chambon-la-Forêt (Loiret) et ceux de Da Lat (Vietnam), Île de Pâques (Chili), Edéa (Cameroun), Kourou (Guyane), La Réunion, Sop/Niakhar (Sénégal), Phu Thuy (Vietnam), Pamatai (Polynésie française) et Tamanrasset (Algérie). La majorité d'entre eux fait partie du réseau international INTERMAGNET.

Les observatoires sont opérés par des observateurs spécifiquement formés pour effectuer les mesures d'étalonnage hebdomadaires. Les observations effectuées sont à la fois d'une grande précision et d'une haute stabilité à long terme. Les observatoires fournissent des données temps réel, quasi-définitives et définitives, qui sont distribuées sous la forme de données secondes, de moyennes sur une minute ou sur de plus longues périodes (heure, jour, mois, année). Ces données sont distribuées sur les portails web du BCMT, de FormaTerre et d'INTERMAGNET, mais aussi à travers les centres de données mondiaux pour les données magnétiques (World Data Centres - WDC) au Royaume-Uni, aux USA et au Japon.

Ces données sont utilisées en premier lieu pour des activités de recherche (dynamique du noyau liquide de la Terre, conductivité du manteau, structure de la croûte, dynamiques de l'ionosphère et de la magnétosphère...), mais également comme des références d'orientation pour l'industrie et comme outils pour le suivi de la météorologie de l'espace. En dehors de ses activités d'observations, le service gère une plateforme de calibrations magnétiques permettant de vérifier la réponse d'un système d'observation à des variations du champ magnétique ou à des variations de la température ambiante.

The Magnetic Observatories Service of IPGP provides ground-based observations of the Earth's magnetic field as well as derived products. It is part of the BCMT, a National Observation Service (SNO) of CNRS-INSU operated by IPGP, with contributions from the magnetic observation service of EOST. IPGP maintains the French networks of variation and repeat stations, as well as ten observatories operated in collaboration with French and international partners: the national magnetic observatory of Chambon-la-Forêt (France), and those located in Da Lat (Vietnam), Easter Island (Chile), Edéa (Cameroon), Kourou (French Guiana), La Réunion, Sop/Niakhar (Sénégal), Phu Thuy (Vietnam), Pamatai (French Polynesia), and Tamanrasset (Algeria). Most of these observatories are part of the international INTERMAGNET network.

The observatories are operated by specially trained observers who perform weekly absolute calibration measurements. The resulting observations are characterized by both high accuracy and long-term stability. The observatories deliver real-time, quasi-definitive, and definitive data products, distributed as second-resolution data as well as minute, hourly, daily, monthly, and annual averages. These datasets are made available through the BCMT, FormaTerre, and INTERMAGNET web portals, as well as via World Data Centres (WDC) for geomagnetism in the United Kingdom, the United States, and Japan.

These data are primarily used for research purposes, including studies of core dynamics, mantle electrical conductivity, crustal structure, and ionospheric and magnetospheric processes. They also serve as orientation references for industrial applications and as key inputs for space weather monitoring. In addition to its observational activities, the service operates a magnetic calibration facility designed to assess the response of measurement systems to variations in the magnetic field and ambient temperature.



Activités en 2025

Activities in 2025

Le cœur des activités de routine de l'équipe couvre comme chaque année, la gestion des données magnétiques collectées ainsi que la maintenance du réseau des observatoires magnétiques et des stations de variation. On note en particulier cette année, la rénovation des observatoires de Phu Thuy et Edéa, l'ouverture de la station de variation sur le Larzac, en collaboration avec l'observatoire hydrogéophysique de l'Observatoire de Recherche Montpelliérain de l'Environnement, OREME. Le BCMT a aussi rejoint l'infrastructure de recherche Epos-France à travers l'action spécifique AS-BCMT du groupe thématique Magnétisme.

The core routine activities of the team include, as in previous years, the management of collected magnetic data and the maintenance of the observatory network and variation stations. Notable developments in 2025 include the refurbishment of the Phu Thuy and Edéa observatories, and the installation of a new variation station on the Larzac plateau, in collaboration with the hydrogeophysical observatory of the Observatoire de Recherche Montpelliérain de l'Environnement (OREME). The BCMT also joined the Epos-France research infrastructure through the dedicated AS-BCMT action within the Magnetism thematic group.

■ Conseil scientifique et Epos-France

Scientific advisory board and epos-france

Deux événements marquants se sont tenus durant l'année 2025. Le 26 mai, le conseil scientifique du BCMT s'est réuni pour l'évaluation à mi-parcours de l'avancement des activités définies dans le plan stratégique 2024-2028. Le rapport qui a été rédigé en préparation de cette étape importante de la vie du service d'observation est disponible publiquement en ligne (activity report 2023-2025), ainsi que les commentaires et recommandations du conseil (Council-report). Celui-ci a en particulier appuyé sur l'importance des observatoires au Vietnam et a encouragé le BCMT à continuer sa collaboration avec les institutions locales pour l'exploitation de ceux-ci, pour le bénéfice de la communauté scientifique internationale.

Two major milestones were achieved in 2025. On 26 May, the BCMT Scientific Council convened to conduct a mid-term evaluation of the activities defined in the 2024-2028 strategic plan. The report prepared for this milestone (Activity Report 2023-2025), along with the Council's recommendations (Council Report), is publicly available online. The Board notably emphasized the importance of the Vietnamese observatories and encouraged continued collaboration with local institutions to ensure their operation for the benefit of the international scientific community.

En 2025, le BCMT a aussi été, avec GEOSCOPE, le premier service national d'observation à intégrer la nouvelle infrastructure de recherche Epos-France. Celle-ci a été fondée sur l'infrastructure RESIF à laquelle participaient déjà les services d'observation sismologiques français. Une nouvelle « Action Spécifique » a donc été définie et créée au sein d'Epos-France : AS-BCMT. Trois membres de l'équipe des observatoires magnétiques de l'IPGP ont participé dans ce cadre à la rencontre bisannuelle d'Epos-France qui s'est tenue en 2025 à Sète. Ils ont pu présenter à cette occasion les activités d'observation en géomagnétisme, engagées par le service. Cette intégration à Epos-France a été possible suite à la révision du portail de distribution de données du BCMT. Parmi les évolutions majeures du portail on note le renforcement de la sécurité du système et l'interfaçage avec l'infrastructure de distribution de données FormaTerre (FormaTerre-BCMT).

In 2025, the BCMT, together with GEOSCOPE, became the first National Observation Service to be integrated into the newly established Epos-France research infrastructure. This infrastructure builds upon the RESIF framework, which already included French seismological observation services. A new dedicated "Specific Action" (AS-BCMT) was therefore created within Epos-France. Three members of the IPGP magnetic observatories team participated in the 2025 Epos-France biennial meeting held in Sète, where they presented the service's geomagnetic observation activities. This integration was made possible by a major upgrade of the BCMT data distribution portal, including enhanced system security and interoperability with the FormaTerre data infrastructure (FormaTerre-BCMT).

1. <https://www.poleterresolide.fr/bcmt-champ-magnetique-terrestre/#/>



■ Rénovation des observatoires de Phu Thuy, Da Lat et Edéa Refurbishment of the Phu Thuy, Da Lat, and Edéa observatories

Les observatoires de Phu Thuy et Da Lat sont situés au Vietnam et exploités en collaboration entre l'IPGP et le VAST (Vietnamese Academy of Science and Technology) depuis les années 90. Ces observatoires sont situés dans une région dans laquelle il n'y a que peu d'observations continues au sol, mais où l'évolution du champ magnétique généré dans le noyau liquide de la Terre est particulière et demande un suivi précis. C'est aussi un pays où la pression anthropique est importante et où les conditions météorologiques sont parfois difficiles avec de nombreux orages et des cyclones. Les observatoires de Da Lat et Phu Thuy sont donc à la fois importants et difficiles à maintenir en état de fonctionnement.

Une mission de maintenance et rénovation a été réalisée en décembre 2025. Elle a permis, à Phu Thuy, la rénovation des bâtiments d'observation, mais surtout de l'infrastructure d'observation, réduisant de manière significative le niveau de bruit dans les données. À Da Lat, les observations n'ont malheureusement pas pu reprendre de manière régulière suite à la défaillance de plusieurs instruments, qui seront remplacés en 2026.

De la même manière, l'observatoire d'Edéa au Cameroun est très isolé et les conditions météorologiques locales sont difficiles. L'observatoire avait été foudroyé en 2024 et cela avait endommagé les instruments. Ceux-ci ont été révisés et les systèmes d'observation rénovés lors d'une mission en novembre 2025, permettant la reprise des observations sur le site.

Les données des observatoires de Phu Thuy et Edéa sont disponibles sur le portail de distribution de données du BCMT, 5 à 10 minutes après acquisition. Le plan stratégique de développement de l'infrastructure d'observation du champ magnétique en France prévoit l'ouverture de cinq stations de variations sur le territoire en plus de l'observatoire magnétique national. Le but est double : d'une part maintenir un système d'observation de l'évolution à long terme du champ magnétique sur l'ensemble du territoire et d'autre part avoir une description précise des variations rapides du champ géomagnétique pour des applications scientifiques aussi bien que techniques et industrielles.

Frédéric Pesqueira, de l'observatoire volcanologique de La Réunion, est intervenu à Phu Thuy pour contribuer à la remise en état de l'observatoire magnétique.

Frédéric Pesqueira, from the volcanological observatory of La Réunion, contributed to the refurbishment of the Phu Thuy magnetic observatory.

The Phu Thuy and Da Lat observatories, located in Vietnam, have been jointly operated by IPGP and the VAST (Vietnamese Academy of Science and Technology) since the 1990s. These observatories are situated in a region where continuous ground-based observations are sparse, yet where the evolution of the magnetic field generated in the Earth's liquid core exhibits distinctive characteristics requiring close monitoring. The region is also subject to significant anthropogenic pressure and challenging meteorological conditions, including frequent thunderstorms and tropical cyclones, making the operation of these observatories both critical and demanding.

A maintenance and refurbishment mission was carried out in December 2025. At Phu Thuy, this operation included the renovation of both the observation buildings and the measurement infrastructure, significantly reducing noise levels in the data. At Da Lat, however, regular observations could not be fully restored due to the failure of several instruments, which are scheduled for replacement in 2026.

Similarly, the Edéa observatory in Cameroon is located in a remote area with difficult environmental conditions. The site was struck by lightning in 2024, damaging several instruments. These were repaired and the observation systems refurbished during a field mission in November 2025, enabling the resumption of measurements. Data from the Phu Thuy and Edéa observatories are available through the BCMT data portal within 5 to 10 minutes of acquisition.

The strategic development plan for geomagnetic observation infrastructure in France includes the deployment of five variation stations across the national territory, complementing the national magnetic observatory. The objectives are twofold: to ensure long-term monitoring of geomagnetic field evolution across France, and to provide high-resolution observations of rapid geomagnetic variations for scientific, technical, and industrial applications.





Vue de l'observatoire magnétique d'Edéa lors des activités de maintenance effectuées sur site en 2025.
View of the Edéa magnetic observatory during maintenance operations conducted in 2025.

■ Ouverture de la station de variation sur le site du Larzac Opening of the Larzac variation station

Après l'ouverture en 2022 d'une station à proximité de Clermont-Ferrand, puis des stations de Menez-Meur (Finistère) en 2023 et de Helfaut (Nord) en 2024, un système d'observation a été installé sur la commune de l'Hospitalet-du-Larzac (Observatoire du Larzac²). Ce site était déjà utilisé pour le suivi de l'évolution du champ gravimétrique. L'adjonction d'un système d'observation magnétique s'appuyant sur l'infrastructure déjà en place a permis l'établissement d'une station magnétique avec un coût très réduit et un nouveau pas vers l'établissement de systèmes d'observations multi-paramètres envisagés dans le cadre de l'infrastructure de recherche « Epos-France ». Les tests effectués ont montré que le site était propice à l'observation magnétique et peu perturbé par l'activité humaine et industrielle à proximité. Malheureusement le système d'observation a été foudroyé en fin d'année 2025, les observations reprendront dans le premier semestre 2026. Comme l'ensemble des sites d'observation continue du champ magnétique gérés par le service, les données collectées sont distribuées 5 minutes après acquisition à travers le portail www.bcmt.fr.

Following the installation of a station near Clermont-Ferrand in 2022, and subsequent stations at Menez-Meur (Finistère) in 2023 and Helfaut (Nord) in 2024, a new observation system was deployed in the municipality of L'Hospitalet-du-Larzac (Larzac Observatory²). This site was already used for monitoring gravity field variations. The addition of a magnetic observation system, as a complement to the existing infrastructure, enabled the establishment of a geomagnetic station at minimal cost and represents a further step toward the development of multi-parameter observatories within the Epos-France research infrastructure. Tests confirmed that the site is well suited for magnetic observations, with minimal disturbance from nearby human or industrial activity. Unfortunately, the system was struck by lightning at the end of 2025; observations are expected to resume in the first half of 2026. As with all continuous geomagnetic observation sites operated by the service, data are distributed within five minutes of acquisition via the BCMT portal www.bcmt.fr.

2. <https://data.oreme.org/observation/gek>



■ Laboratoire d'archéomagnétisme Archaeomagnetism laboratory

L'observatoire magnétique national de Chambon-la-Forêt accueille dans ses locaux le laboratoire d'archéomagnétisme rattaché à l'équipe Paléomagnétisme Paléoclimat Environnement de l'IPGP. Au cours des deux dernières années, les activités du laboratoire ont été renforcées grâce à une convention de collaboration établie entre l'IPGP et l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap). Le laboratoire est ainsi ouvert à des archéologues formés aux techniques de l'archéomagnétisme, qui interviennent bien au-delà de leurs activités traditionnelles de fouilles : échantillonnage de structures de combustion (fours de potier, domestiques, fours à chaux, etc.), préparation des échantillons, analyses archéomagnétiques et interprétation des résultats pour dater les structures étudiées.

La demande pour cette approche de datation basée sur les variations directionnelles du champ géomagnétique en France au cours des derniers millénaires ne cesse en effet de croître, tant de la part de l'Inrap que d'autres acteurs de la recherche archéologique nationale, tels que les services municipaux et départementaux d'archéologie. Pour répondre à cette demande, le laboratoire d'archéomagnétisme, soutenu par la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (MITI) du CNRS, développe activement de nouveaux instruments et de nouvelles techniques d'analyses. Ces avancées visent à renforcer son intégration dans le paysage de la recherche archéologique française. L'observatoire magnétique national contribue à ces développements, en mettant à profit son expertise en capteurs magnétiques et en mesures instrumentales du champ géomagnétique. Par ailleurs, avec l'appui de l'IPGP et du Laboratoire d'Archéologie Moléculaire et Structurale (LAMS, Sorbonne Université), une initiative est en cours pour structurer et ouvrir des archives archéomagnétiques, qui seront accessibles à l'ensemble de la communauté scientifique.

The Chambon-la-Forêt national magnetic observatory hosts the archaeomagnetism laboratory affiliated with the Paleomagnetism Paleoclimate Environment team at IPGP. Over the past two years, the laboratory's activities have been strengthened through a collaboration agreement between IPGP and the Inrap (French national Institute for Preventive Archaeological Research). The facility is now open to archaeologists trained in archaeomagnetic techniques, who contribute beyond traditional excavation activities, including sampling of combustion structures (e.g., pottery kilns, domestic ovens, lime kilns), sample preparation, archaeomagnetic analysis, and interpretation for dating purposes.

Demand for this dating method, based on directional variations of the geomagnetic field over the past millennia in France, continues to grow, both from Inrap and from other stakeholders in national archaeological research, including municipal and departmental archaeological services. To meet this demand, the archaeomagnetism laboratory, supported by the CNRS Mission for Transversal and Interdisciplinary Initiatives (MITI), is actively developing new instruments and analytical techniques. These advances aim to strengthen its integration within the French archaeological research landscape. The national magnetic observatory contributes to these developments through its expertise in magnetic sensors and geomagnetic measurements. In parallel, with the support of IPGP and the LAMS, an initiative is underway to structure and open archaeomagnetic archives accessible to the broader scientific community.



Echantillonnage archéomagnétique de trois fours de potier romain découverts près de Noyon (Oise). Fouilles Inrap Hauts-de-France ; photo ©Y. Gallet.

Archaeomagnetic sampling of three Roman pottery kilns discovered near Noyon (Oise). Inrap Hauts-de-France excavations. Photo: Y. Gallet.



■ Autres activités

Collaborations, visits and agreements

Régulièrement, sur une base biennale, le service des observatoires magnétiques de l'IPGP effectue un levé national de données magnétiques absolues. Ce levé s'effectue sur des sites établis dont le réseau évolue régulièrement. Au 20^{ème} siècle ce réseau était dense, mais les missions satellitaires qui se succèdent ont permis de réduire celui-ci à une dizaine de stations en France. Ce réseau inclut maintenant aussi les stations de variation permanentes dont le déploiement a commencé en 2022. Un levé a été effectué entre mai et juillet 2025, les données sont disponibles sur le portail de distribution du BCMT.

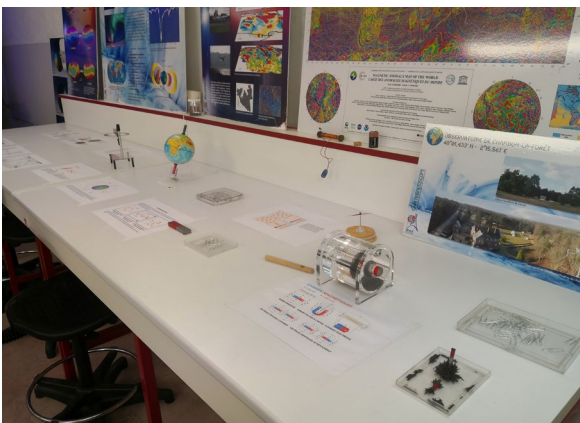
Le service d'observation magnétique de l'IPGP maintient sur le site de l'observatoire national des capacités de calibration d'instrument de mesure magnétique. En 2025 ces capacités ont été utilisées pour la calibration du nanosatellite étudiant IGOSat développé au sein de l'Université Paris Cité. Ce satellite a pour but d'observer l'ionosphère terrestre et le flux de rayonnement gamma et d'électrons énergétiques. D'une taille de 30x10x10 cm, IGOSat pourra maintenir son orientation en orbite en s'appuyant sur le champ magnétique terrestre.

L'observatoire magnétique national de Chambon-la-forêt a ouvert ses portes au public lors de la Fête de la Science en octobre 2025. Les membres de l'équipe ont présenté les activités d'observation du champ magnétique depuis plus d'un siècle en France et sur ce site depuis 1936, les instruments de mesure et les enjeux scientifiques de ces observations, ainsi que les activités du laboratoire d'archéomagnétisme sur le site et la reconstitution de l'évolution du champ magnétique dans les derniers millénaires.

On a regular biennial basis, the IPGP Magnetic Observatories Service conducts a national survey of absolute geomagnetic data. This survey is performed at established sites within a network that has evolved over time. While the network was dense during the 20th century, successive satellite missions have enabled its reduction to approximately ten stations across France. The network now also includes permanent variation stations deployed since 2022. A survey was conducted between May and July 2025, and the data are available via the BCMT data portal.

The service also maintains magnetic instrument calibration facilities at the national observatory site. In 2025, these facilities were used to calibrate the student nanosatellite IGOSat, developed at Université Paris Cité. This satellite is designed to observe the Earth's ionosphere as well as gamma rays and energetic electron fluxes. Measuring 30x10x10 cm, IGOSat is capable of maintaining its orientation in orbit using the Earth's magnetic field.

The Chambon-la-Forêt national magnetic observatory opened its doors to the public during the Fête de la Science in October 2025. Team members presented more than a century of geomagnetic observation activities in France, including continuous measurements at the site since 1936, the instrumentation used, the scientific challenges associated with these observations, as well as the activities of the archaeomagnetism laboratory and the reconstruction of geomagnetic field variations over recent millennia.



Activités proposées aux enfants dans le cadre de la Fête de la Science à l'observatoire magnétique national de Chambon-la-forêt.

Activities proposed for children during the Fête de la Science at the Chambon-la-Forêt national magnetic observatory.

En savoir plus / Read more :

Portail web du BCMT / BCMT web portal : www.bcmt.fr

Contact : bcmt@ipgp.fr



Observatoire GEOSCOPE GEOSCOPE observatory

La mission de l'observatoire GEOSCOPE est de fournir des données sismologiques large bande validées, de haute qualité, aux communautés sismologiques française et internationale. Constitué d'un réseau de 35 stations sismologiques réparties dans le monde entier, toutes équipées pour fournir des données en temps réel, GEOSCOPE est en premier lieu dédié aux travaux de recherche. Ainsi, ses données sont utilisées pour l'étude de la structure et de la dynamique terrestres, l'analyse des sources sismiques, le suivi temporel des phénomènes de déformation ou encore la sismologie environnementale. En outre, l'observatoire fournit ses données en temps réel aux organismes d'alerte des séismes et des tsunamis partout dans le monde.

GEOSCOPE est géré conjointement par l'EOST à Strasbourg et par l'IPGP à Paris, qui assure l'instrumentation et la maintenance de 24 stations, ainsi que la mise à disposition de toutes les données à travers son centre de données. Celles-ci sont aussi disponibles via les centres de données Epos-France et EarthScope et sont largement utilisées par la communauté scientifique, avec plus de 1800 publications mentionnant explicitement GEOSCOPE depuis 1982. Ces données sont également exploitées au sein de l'observatoire, afin de fournir des informations telles que l'estimation rapide des paramètres de sources d'un tremblement de terre (catalogue disponible sur le site web). Dix personnes sont impliquées dans l'équipe, six à l'IPGP et quatre à l'EOST (quatre enseignants-chercheurs, cinq ingénieurs et un administratif).

The mission of the GEOSCOPE observatory is to provide validated, high-quality broadband seismic data to the French and international seismological communities. Comprising a global network of 35 seismic stations, all equipped to deliver real-time data, GEOSCOPE is primarily dedicated to research activities. Its data are used to investigate Earth's structure and dynamics, analyze seismic sources, monitor temporal variations in deformation processes, and support environmental seismology studies. In addition, the observatory supplies real-time data to earthquake and tsunami warning centers worldwide.

GEOSCOPE is jointly operated by EOST in Strasbourg and IPGP in Paris, which is responsible for the instrumentation and maintenance of 24 stations, as well as for the dissemination of all data through its data center. These data are also accessible via the Epos-France and EarthScope data centers and are widely used by the scientific community, with more than 1,800 publications explicitly referencing GEOSCOPE since 1982. The data are also exploited within the observatory to provide products such as rapid estimates of earthquake source parameters (catalog available on the website). The team comprises ten staff members: six at IPGP and four at EOST (four faculty researchers, five engineers, and one administrative staff member).

Activités en 2025

Activities in 2025

■ Principaux travaux pour améliorer et entretenir le réseau

Key efforts to maintain and upgrade the network

- Ajout de capteurs très-large-bande de nouvelle génération (T360) aux stations CRZF (Île Crozet, avril 2025) et ATD (Djibouti, décembre 2025). Ces stations rejoignent ainsi plusieurs autres (ECH, TAM, SANVU) qui possèdent deux capteurs très-large-bande colocalisés.
- Réinstallation de la station AIS (Île d'Amsterdam) en novembre 2025. La station avait été arrêtée suite au grave incendie qui avait ravagé l'île en janvier 2025.
- Missions effectuées aux stations EDA (Cameroun) et FOMA (Madagascar) pour remédier à des soucis d'énergie et de communication, et améliorer l'infrastructure des stations.
- Deployment of new-generation very broadband sensors (T360) at stations CRZF (Crozet Islands, April 2025) and ATD (Djibouti, December 2025). These stations now join several others (ECH, TAM, SANVU) equipped with two co-located very broadband sensors.
- Reinstallation of station AIS (Amsterdam Island) in November 2025, following its shutdown due to the major wildfire that affected the island in January 2025.
- Field missions conducted at stations EDA (Cameroon) and FOMA (Madagascar) to resolve power supply and communication issues and to upgrade station infrastructure.



Le nouveau capteur T360 installé à la station ATD (Djibouti) en décembre 2025.

Newly installed T360 sensor at station ATD (Djibouti), December 2025.



Entrée de la cave sismique à la station FOMA (Madagascar) après sa réfection en juin 2025.
Entrance to the seismic vault at station FOMA (Madagascar) after refurbishment in June 2025.



■ Anticipation du vieillissement des capteurs large-bande STS-1

Anticipating the ageing of STS-1 broadband sensors

GEOSCOPE est un des seuls réseaux au monde à fournir des données très large bande jusqu'à des périodes de 360 secondes et au-delà. En 2025, GEOSCOPE a poursuivi l'acquisition de sismomètres de nouvelle génération, avec l'achat de deux Trillium T360. Ces capteurs seront installés au sein des stations les plus menacées par le vieillissement des STS-1, ainsi que dans les nouvelles stations en projet. Contrairement à leurs prédécesseurs, ces sismomètres intègrent leurs trois composantes dans une même enceinte qui n'a plus besoin d'être mise sous vide, simplifiant leur installation et leur maintenance. Les cinq capteurs T360 de cave récemment installés aux stations TAM (Algérie), ECH (Alsace), SANVU (Vanuatu), CRZF (Île Crozet) et ATD (Djibouti), mais également les deux capteurs T360 de puits installés aux stations SOK (Sénégal) et MATO (Brésil), montrent un excellent fonctionnement, validant ainsi cette évolution.

GEOSCOPE is one of the very few networks worldwide capable of providing very broadband data at periods up to 360 seconds and beyond. In 2025, GEOSCOPE continued its transition toward next-generation instrumentation with the acquisition of two Trillium T360 seismometers. These sensors will be deployed at stations most affected by the ageing of STS-1 instruments, as well as at newly planned stations. Unlike their predecessors, these seismometers integrate three components within a single enclosure that does not require a vacuum, thereby simplifying installation and maintenance. The five vault-installed T360 sensors recently deployed at stations TAM (Algeria), ECH (Alsace), SANVU (Vanuatu), CRZF (Crozet Islands), and ATD (Djibouti), along with two borehole T360 sensors installed at stations SOK (Sénégal) and MATO (Brazil), have demonstrated excellent performance, confirming the relevance of this technological evolution.

■ Validation des données et suivi de la diffusion des produits dérivés mis en place par l'observatoire.

Data validation and dissemination monitoring

Toutes les données disponibles de l'année 2024 ont été récupérées, vérifiées et transmises au centre de données de l'IPGP. Les informations sur les séismes récents sont diffusées sur le compte bluesky @geoscope-ipgp, depuis l'arrêt de la diffusion sur X/twitter en 2024.

All available data from 2024 have been retrieved, quality-controlled, and transmitted to the IPGP data center. Information on recent earthquakes is now disseminated via the Bluesky account @geoscope-ipgp, following the discontinuation of communication on X (formerly Twitter) in 2024.

En savoir plus / Read more :

Site internet / Website : <http://geoscope.ipgp.fr>

Compte Bluesky / Bluesky Account : @geoscope_ipgp

Contact : www.geos@ipgp.fr



Observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles OBSERA Observatory of water and erosion in the Antilles OBSERA

Pour l'Observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles, l'année 2025 marque le début d'une collaboration avec l'Observatoire de la Zone Critique de l'OSU Réunion sur une série de sites instrumentés, situés dans le bassin de la Rivière des Pluies, sur l'île de La Réunion. Ce rapprochement répond à une double logique. Il s'inscrit d'abord dans une logique scientifique : les sites réunionnais, comme ceux de Guadeloupe, sont consacrés à l'étude des modalités de l'érosion mécanique et chimique et de leurs liens avec les grands cycles géologiques, en contexte insulaire, volcanique et tropical. Il relève ensuite d'une logique institutionnelle, les deux équipes étant rattachées à l'UMR IPGP. Si ce rapprochement est validé par l'INSU, ObsERA deviendra l'Observatoire de l'Eau et de l'Érosion à La Réunion et aux Antilles.

Cette collaboration permet à ObsERA de s'ouvrir à de nouvelles thématiques. À titre d'exemple, ce bassin offre un cadre particulièrement favorable pour étudier l'impact des glissements de terrain lents sur la dynamique de l'érosion en contexte tropical. Ce type d'instabilités de versant est encore peu documenté, bien qu'il puisse engendrer d'importants dégâts matériels et, potentiellement, de nombreuses victimes. Leur surveillance, la compréhension des mécanismes qui les gouvernent et l'identification des facteurs contrôlant leur déplacement présentent donc un enjeu sociétal majeur.

Toutefois, l'instrumentation in-situ de ces glissements demeure souvent complexe, en raison de conditions d'accès difficiles et de l'absence d'infrastructures permettant le maintien durable des dispositifs de mesure. Dans le cadre de sa thèse, Coline Hopquin, a mis en œuvre une approche reposant sur l'interférométrie radar (InSAR) et l'imagerie optique pour étudier la dynamique du glissement de terrain lent du Grand Éboullis, situé dans le bassin versant de la Rivière des Pluies.

En collaboration avec des collègues du Centre Européen de Géodynamique et Sismologie (ECGS, Luxembourg) pour l'analyse des images satellites, et grâce à l'acquisition pluriannuelle d'images aériennes à haute résolution (par drone), cette thèse a permis de mettre en évidence les relations

For the Water and Erosion Observatory in the French West Indies, the year 2025 marks the beginning of a collaboration with the Critical Zone Observatory of OSU Réunion across a series of instrumented sites located in the Rivière des Pluies watershed on Réunion Island. This rapprochement follows a dual rationale. It is first rooted in a scientific perspective: the sites in Réunion, like those in Guadeloupe, are dedicated to studying the mechanisms of mechanical and chemical erosion and their links with major geological cycles, within insular, volcanic, and tropical settings. It also reflects an institutional rationale, as both teams are affiliated with the IPGP joint research unit (UMR IPGP). If this rapprochement is approved by INSU, ObsERA will become the Water and Erosion Observatory in Réunion and the French West Indies.

This collaboration enables ObsERA to expand into new research areas. In particular, this basin provides an exceptional natural laboratory for investigating the impact of slow-moving landslides on erosion dynamics in tropical environments. Such slope instabilities remain poorly documented, despite their potential to cause significant damage and, in some cases, substantial loss of life. Monitoring these processes, understanding the mechanisms that govern them, and identifying the factors controlling their displacement therefore represent major societal challenges.

However, in situ instrumentation of such landslides is often challenging due to difficult access conditions and the lack of infrastructure required for the long-term deployment of monitoring systems. As part of her PhD research, Coline Hopquin developed an approach combining radar interferometry (InSAR) and optical imaging to investigate the dynamics of the Grand Éboullis slow-moving landslide, located within the Rivière des Pluies watershed.

In collaboration with colleagues from the ECGS for satellite image analysis, and through the acquisition of multi-year high-resolution aerial imagery (using drones), this work has revealed the relationships between monthly and multi-annual landslide displacements and precipitation regimes. The methodology enabled the quantification of: (1) bi-monthly

entre les mouvements mensuels et pluriannuels du Grand Éboulis et les régimes de précipitations. L'approche développée a permis de quantifier : (1) la dynamique bimestrielle du glissement à partir de cartes de déplacements cumulatifs et de séries temporelles de déformation du sol dérivées des images Sentinel-1, et (2) sa dynamique pluriannuelle à partir d'images aériennes optiques.

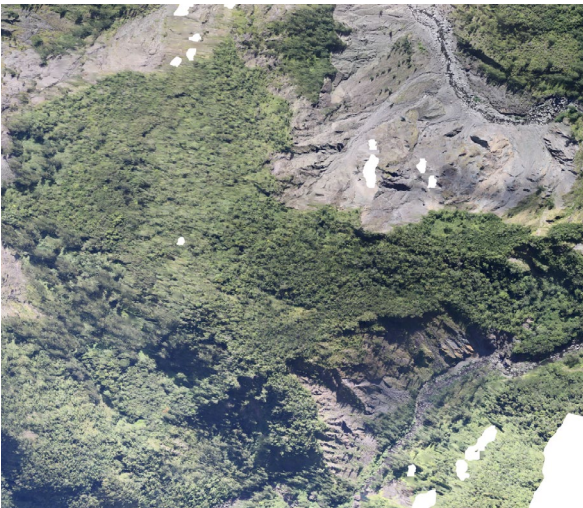
Les résultats montrent qu'entre 2016 et 2021, le glissement de terrain s'est déplacé vers l'est et vers l'aval à des vitesses pouvant atteindre respectivement 14 cm/an et 9 cm/an. Ce déplacement a été marqué par des phases d'accélération consécutives à une saison exceptionnellement humide au milieu de l'année 2018. À l'inverse, deux périodes de ralentissement ont coïncidé avec la saison sèche de 2018, une année 2019 particulièrement aride et une sécheresse prolongée en 2020. Par ailleurs, entre 2017 et 2019, des ruptures superficielles ont été cartographiées uniquement en 2018 au niveau du front du glissement, et attribuées au passage du cyclone Dumazile.

Cette thèse suggère ainsi que les glissements de terrain lents peuvent réagir aux contrastes saisonniers par une modulation de leur déplacement continu, et aux événements climatiques extrêmes.

landslide dynamics based on cumulative displacement maps and ground deformation time series derived from Sentinel-1 imagery, and (2) multi-annual dynamics derived from optical aerial imagery.

The results indicate that between 2016 and 2021, the landslide migrated eastward and downslope at rates reaching up to 14 cm/year and 9 cm/year, respectively. This displacement was punctuated by acceleration phases following an exceptionally wet season in mid-2018. Conversely, two phases of deceleration coincided with the 2018 dry season, an exceptionally dry year in 2019, and a prolonged drought in 2020. Furthermore, between 2017 and 2019, surface ruptures were mapped exclusively in 2018 at the landslide front and were attributed to the passage of Cyclone Dumazile.

This work suggests that slow-moving landslides may respond to seasonal contrasts through modulation of their continuous displacement, as well as to extreme climatic events.



Images aériennes orthorectifiées de Grand Éboulis. Cette image a été reconstruite à partir des différentes photos prises par ULM en 2019 (N. Villeneuve, Univ Réunion) dans la Rivière des pluies. C'est la comparaison avec les autres images de 2017 et 2018, reconstituées selon le même protocole, qui a permis de cartographier et dater les traces de ruptures superficielles. (Photo : Coline Hopquin et N. Villeneuve).

Orthorectified aerial image of the Grand Éboulis landslide. This image was reconstructed from a series of photographs acquired by ultralight aircraft (N. Villeneuve, Université de La Réunion) in 2019 over the Rivière des Pluies catchment. Comparison with similar reconstructions from 2017 and 2018 enabled the mapping and dating of surface rupture features. (Photo: Coline Hopquin and N. Villeneuve).



Vue du front Nord de Grand Éboulis et de la rivière des pluies à l'étiage (Novembre 2023). Les traces de ruptures superficielles ainsi que les cones formés par l'accumulation des produits de déstabilisations sont bien visibles au pied du glissement. Bien qu'en perpétuel mouvement, le déplacement lent de certaines zones du glissement permettent le développement de sols et de la végétation. (Photo : C. Hopquin et N. Villeneuve).

View of the northern front of the Grand Éboulis landslide and the Rivière des Pluies under low-flow conditions (November 2023). Surface rupture traces and depositional cones formed by the accumulation of landslide-derived material are clearly visible at the base of the slope. Despite its continuous motion, the slow displacement of certain sectors allows for soil development and vegetation growth. (Photo: C. Hopquin).



Observatoires volcanologiques et sismologiques Volcanological and seismological observatories

L'IPGP est en charge de la surveillance des quatre volcans actifs français situés dans les outre-mer, ainsi que de leur sismicité régionale et des risques potentiels associés de formation de tsunamis, à travers ses observatoires volcanologiques et sismologiques (OVS) et son équipe à Paris :

- l'OVS-G-IPGP est en charge de la Soufrière de Guadeloupe
- l'OVS-M-IPGP est en charge de la Montagne Pelée à la Martinique
- l'OVS-R-IPGP est en charge du Piton de la Fournaise à La Réunion
- la structure nationale du Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA), opérée par l'IPGP (via l'OVS-R) et le BRGM et en partenariat avec le CNRS et l'IFREMER, est en charge de la zone volcanique sous-marine et du Fani Maoré à Mayotte.

Les Observatoires volcanologiques et sismologiques de l'IPGP et la structure nationale REVOSIMA continuent le travail nécessaire à leur intégration au sein de l'infrastructure de recherche Epos-France via le Service national d'observation en volcanologie (SNOV) dans la thématique volcanologie.

La troisième assemblée générale du Service national d'observation en volcanologie (SNOV) du CNRS-INSU, sous la responsabilité de l'IPGP et de l'OPGC (UCA), a été organisée en décembre 2025. Cet événement a rassemblé environ 40 personnes sur 1 jour, et notamment des personnels venus depuis les observatoires en outre-mer, contribuant de manière significative à renforcer l'intégration de la communauté française et à développer des synergies dans la recherche fondamentale et opérationnelle (surveillance) autour des volcans français.

Un ingénieur financé en partie par le ministère de l'écologie a apporté de nouvelles fonctionnalités à l'outil WebObs, code communautaire labellisé par l'INSU au coeur des observatoires volcanologiques et sismologiques : des formulaires de saisie manuelle générique indispensables pour sauvegarder en particulier toutes les données d'échantillonnage et d'analyse de géochimie et

The IPGP is responsible for monitoring the four active French volcanoes located in the French overseas territories, as well as their regional seismicity and the associated potential risks of tsunami formation, through its volcanological and seismological observatories (OVS) and its team in Paris:

- the OVS-G-IPGP is in charge of the Soufrière in Guadeloupe
- the OVS-M-IPGP is in charge of Montagne Pelée in Martinique
- the OVS-R-IPGP is in charge of the Piton de la Fournaise in Reunion Island
- the Volcanological and seismological monitoring network of Mayotte (REVOSIMA), a national structure operated by IPGP (through OVS-R) and BRGM in collaboration with CNRS and IFREMER, is in charge of the submarine volcanic area and the Fani Maoré in Mayotte.

The IPGP's volcanological and seismological observatories and the REVOSIMA national structure have begun the work required to integrate them within the Epos-France research infrastructure through the CNRS-INSU's National service for observation in volcanology (SNOV) in Epos-France volcanology theme.

The third general assembly of the National service for observation in volcanology (SNOV) of CNRS-INSU, under the responsibility of IPGP and OPGC (UCA), was organized in December 2025. This event brought together around 40 people over 1 day, including several members from the overseas territories, making a significant contribution to strengthening the integration of the French community and fostering synergies in fundamental and operational research (monitoring) around French volcanoes.

An engineer, partly funded by the ministry of ecology, has brought new functionalities to the WebObs tool, a community code recognized by INSU at the heart of the volcanological and seismological observatories: generic manual forms necessary to store in particular all geochemistry and petrology sampling and analysis data, the support of



pétrologie, le support du langage Python qui permet à des contributeurs d'intégrer facilement leurs codes à WebObs.

Python language which allows contributors to seamlessly integrate their codes to WebObs.

Un nouvel ingénieur de recherche du CNRS spécialisé en géochimie a rejoint l'équipe des observatoires volcanologiques et sismologiques en 2025. Il travaille à améliorer les protocoles d'échantillonnage et d'analyse des fluides et produits magmatiques sur les 4 volcans actifs, en lien avec les plateformes instrumentales d'analyse de l'IPGP.

A new CNRS research engineer in geochemistry joined the volcanological and seismological team in 2025. He works on improving the sampling and analysis protocol of magmatic fluids and products on the 4 volcanoes, in link with the IPGP instrumental analysis platforms.

Au cours de l'année, deux réunions du comité d'experts en volcanologie de l'IPGP (CEV) ont eu lieu en juin et juillet pour proposer un avis à la direction de l'IPGP suite à l'apparition d'essaims de sismicité longue-période et hybride profonde sous la Montagne Pelée en Martinique.

During the year, two meetings of the IPGP's Committee of Experts in Volcanology (CEV) was held in June and July to propose an advice to the IPGP's Director's Office following the apparition of swarms of long-period and hybrid seismicity under Montagne Pelée in Martinique.

Activités en 2025

Activities in 2025

■ Résumé de l'activité au Piton de la Fournaise en 2025

Summary of Piton de la Fournaise activity in 2025

Le réveil progressif du Piton de la Fournaise

L'année 2025 a marqué la fin d'une période de calme exceptionnelle pour le Piton de la Fournaise. Après deux ans et demi sans éruption et près de dix-neuf mois sans signe d'activité profonde, des signes clairs de réactivation du système d'alimentation magmatique du volcan ont été enregistrés par l'OVPF-IPGP fin 2025.

The gradual unrest of Piton de la Fournaise

The year 2025 marked the end of an exceptionally calm period for Piton de la Fournaise. After two and a half years without an eruption and nearly nineteen months without any signs of deep activity, the volcano showed clear signs of reactivation in its magmatic feeding system by the end of 2025.

Premiers signaux

Dès la mi-septembre 2025, l'équipe de l'OVPF-IPGP a détecté une sismicité profonde enregistrée par les instruments de surveillance qu'elle maintient, localisée à environ 20 km de profondeur sous la région des Plaines (Plaine des Cafres et Plaine des Palmistes ; Figure X1) au niveau du flanc externe occidental du volcan. Ces séismes ont révélé des mouvements de magma en profondeur et/ou une augmentation de la pression dans les conduits internes du volcan.

First signs

As early as mid-September 2025, monitoring instruments from OVPF-IPGP detected deep seismic activity, located about 20 km beneath the Plaines region (Plaine des Cafres and Plaine des Palmistes; Figure X1) on the western outer flank of the volcano. These earthquakes revealed deep magma movements and/or increased pressure in the volcano's internal conduits.

Migration de la sismicité

À partir du 22 novembre, l'activité sismique est devenue plus superficielle et s'est rapprochée du cône terminal du Piton de la Fournaise, avec des séismes localisés entre 4 et 5 km de profondeur sous le sommet (Figure X1). Quatre jours plus tard, une augmentation de la sismicité superficielle (entre 1 et 2,5 km de profondeur) a été observée. Fin novembre, une inflation de l'édifice volcanique a confirmé la pressurisation du réservoir magmatique superficiel localisé vers 2 km de profondeur sous le cratère Dolomieu.

Migration of seismicity

Starting on November 22, seismic activity became shallower and moved closer to the terminal cone of Piton de la Fournaise, with earthquakes located between 4 and 5 km depth below the summit (Figure X1). Four days later, an increase in shallow seismicity (between 1 and 2.5 km depth) was observed. By the end of November, inflation of the volcanic edifice confirmed the pressurization of the shallow magmatic reservoir, located about 2 km beneath the Dolomieu crater.



Suite à cette augmentation de la sismicité superficielle et sur avis de l’OVPF-IPGP, le Préfet de La Réunion a activé la phase Vigilance du dispositif ORSEC « Volcan du Piton de la Fournaise » le 28 novembre 2025.

Une réalimentation en magma

Cette séquence sismique, depuis les profondeurs du système magmatique sous les Plaines jusqu’au sommet du Piton de la Fournaise, a signé la remontée de magma profond vers le système d’alimentation superficiel du volcan.

Première intrusion magmatique

Le 5 décembre 2025, la mise en pression du réservoir superficiel a provoqué une intrusion magmatique : le magma a commencé à se propager vers le sommet depuis le réservoir superficiel déclenchant une crise sismique, sans toutefois atteindre la surface. Le magma a migré verticalement sur une hauteur de moins de 500 m sous la bordure est du cratère Dolomieu (Figure X1). Il s’agissait de la première activité magmatique vers la surface depuis août 2023.

Au cours de cette intrusion, l’alerte 1 du dispositif ORSEC « Volcan du Piton de la Fournaise » a été activée du 5 au 8 décembre par le Préfet de La Réunion, avant un retour au niveau de Vigilance le 9 décembre.

Following the increase in shallow seismicity and based on the recommendation of OVPF-IPGP, the Préfet de La Réunion activated the Vigilance phase of the ORSEC “Volcan du Piton de la Fournaise” emergency plan on November 28, 2025.

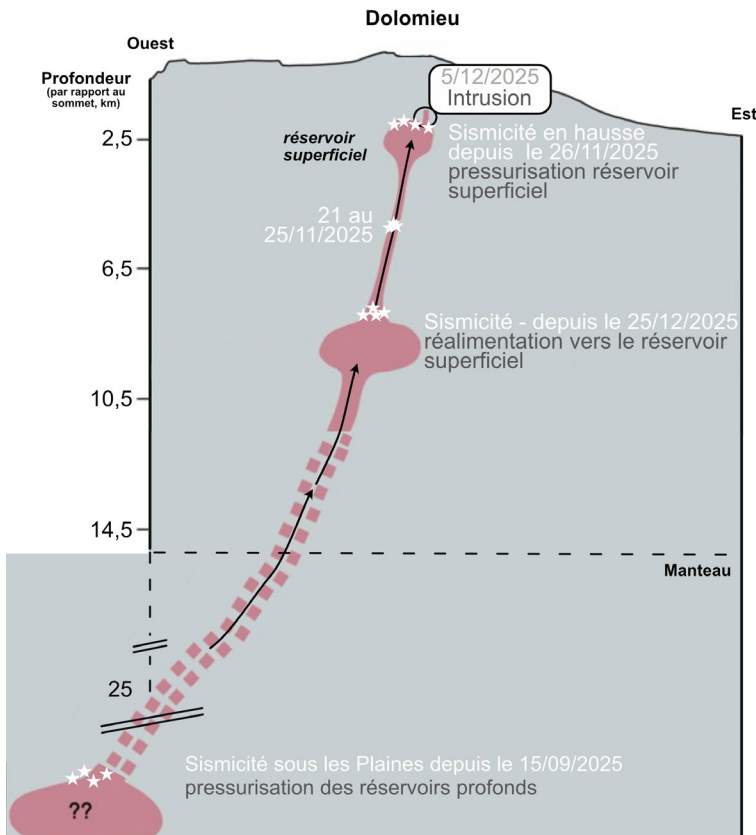
Magma refilling

This seismic sequence, from the depths below the Plaines area to the summit of Piton de la Fournaise, imaged the ascent of deep magma toward the volcano’s shallow feeding system.

First magmatic intrusion

On December 5, 2025, the pressurization of the shallow reservoir caused a magma intrusion: magma began to propagate toward the summit from the shallow reservoir triggering a seismic crisis, though it did not reach the surface. The magma migrated vertically over a height of less than 500 m beneath the eastern rim of the Dolomieu crater (Figure X1). This was the first magmatic activity toward the surface since August 2023.

During this intrusion, the Préfet de La Réunion activated the Alert 1 of the ORSEC “Volcan du Piton de la Fournaise” emergency plan from December 5 to 8, before reverting to the Vigilance phase on December 9.



Vue schématique du système d’alimentation magmatique du Piton de la Fournaise, illustrant les principales phases de réactivation observées entre mi-septembre et fin 2025. À noter que les séismes, de très faible magnitude, n’ont pour la plupart pas pu être localisés. Les étoiles en blanc représentent les localisations schématiques des séismes.



Une réactivation toujours en cours

Fin 2025, le processus de réactivation du système magmatique était toujours en cours. Suite à l'intrusion du 5 décembre 2025, une deuxième intrusion a eu lieu le 1^{er} janvier 2026, puis une courte éruption du 18 au 20 janvier 2026, une 3^{ième} intrusion le 6-7 février et enfin une deuxième éruption débutée le 23 février et toujours en cours à l'écriture de ce rapport.

Ongoing reactivation

By the end of 2025, the reactivation process of the magmatic system was still ongoing. Following the intrusion of 5 December 2025, a second intrusion occurred on 1st January 2026, then a short eruption from 18 to 20 January 2026, a third intrusion on 6–7 February, and finally a second eruption that began on 23 February and was still ongoing at the time of writing this report.

■ Conséquence du cyclone Garance sur les infrastructures de l'OVPF-IPGP Impact of cyclone Garance on the OVPF-IPGP infrastructure

Le 28 février 2025, l'île de La Réunion était gravement impactée par le cyclone Garance avec le passage de son œil sur l'île et des rafales de vent atteignant jusqu'à 234 km/h sur les reliefs (alerte rouge sur tout le territoire de La Réunion du 27 février 19h au 1^{er} mars 10h, incluant une alerte violette et un confinement total le 28 février de 9h à 12h).

- Les coupures d'électricité, d'eau et de réseau internet ont impacté le bon fonctionnement de l'observatoire, mais la prise de relai automatique par le groupe électrogène a permis une poursuite des activités de surveillance, pendant le cyclone et jusqu'au retour du réseau électrique le 2 mars. Suite à plusieurs coupures sur les câbles, les deux fibres internet étaient de nouveau opérationnelles le 5 mars en fin d'après-midi, et l'observatoire de nouveau alimenté en eau ce même jour. A l'intérieur des bâtiments, des infiltrations d'eau se sont produites mais grâce à la pose préventive de bâches et à la mise en sécurité du matériel informatique avant le passage du cyclone, aucun appareil n'a été endommagé. Néanmoins la toiture du bâtiment déjà en mauvais état suite au passage des cyclones Batsirai (2022) et Belal (2024) a subi de nouvelles dégradations et nécessiterait une réfection complète pour un coût estimé à 72 000 euros.
- Le 28 février à midi, l'OVPF-IPGP ne recevait plus que les données de 16 % de ses stations, à savoir :
 - > 9 stations sismologiques sur 42 (21 %)
 - > 3 stations GNSS sur 27 (11 %)
 - > 1 station inclinométrique sur 10 (10 %)
 - > 0 station extensométrique sur 3 (0 %)
 - > 2 stations CO₂-sol sur 4 (50 %)
 - > 0 station NOVAC (SO₂-air) sur 3 (0 %)
 - > 0 station multigaz sur 1 (0 %)
 - > 1 webcam sur 10 (10 %)

L'OVPF-IPGP a réussi à maintenir à tout moment une surveillance opérationnelle minimale de l'activité volcanique, malgré un « mode très dégradé ».

On February 28, 2025, La Réunion was hit by cyclone Garance, with the cyclone eye passing over the island and wind gusts of up to 234 km/h over the reliefs (red alert for the entire island from February 27 7pm to March 1 10am, including a violet alert on February 28 from 9am to 12pm).

- The power, water and internet network disruption affected the proper functioning of the observatory's operations, but the automatic backup provided by the generator enabled the continuation of monitoring activities during the cyclone and until the power was restored on March 2. Following several cuts to the cables, both internet fibers connections were operational again by late afternoon on March 5, and the observatory was reconnected to the water supply that same day. Inside the buildings, water infiltrations occurred, but thanks to the preventive installation of tarpaulins and the securing of IT equipment before the cyclone, no equipment was damaged. However, the roof of the building, which was already in a poor state of repair after the cyclones Batsirai (in 2022) and Belal (in 2024), suffered further damage and will need to be repaired (estimated cost: 72,000 euros).
- In the field, at noon on February 28, the OVPF-IPGP was only receiving data from 16 % of its network, namely:
 - > 9 seismic stations out of 42 (21 %),
 - > 3 GNSS stations out of 27 (11 %),
 - > 1 tiltmeter station out of 10 (10 %),
 - > 0 extensometer station out of 3 (0 %),
 - > 2 soil CO₂ stations out of 4 (50 %),
 - > 0 NOVAC (air SO₂) stations out of 3 (0 %),
 - > 0 multi-gas station out of 1 (0 %),
 - > 1 webcam out of 10 (10 %).

The OVPF-IPGP managed to maintain minimal operational monitoring of volcanic activity throughout the cyclone, despite a “highly degraded mode”.



Le lundi 3 mars en soirée, grâce à l'intervention des équipes sur le terrain – en particulier sur les relais stratégiques –, les antennes endommagées ont pu être remplacées et celles retournées par les vents cycloniques réorientées. Ainsi, 67 % des stations étaient à nouveau opérationnelles et transmettaient leurs données à l'observatoire.

Le 5 mars, une mission hélicoptérée d'une équipe de l'OVPF-IPGP a révélé un fort impact du cyclone sur les stations de l'OVPF-IPGP situées au sommet (à savoir les zones qui ont été exposées aux vents les plus forts), avec trois stations totalement détruites, 3 partiellement endommagées, et de nombreux panneaux solaires et antennes détruites (Figure X2).

Le 7 mars, une semaine après le passage du cyclone, grâce à la forte mobilisation sur le terrain et à l'expertise des équipes de l'OVPF-IPGP, 83 % du réseau de surveillance du Piton de la Fournaise était de nouveau opérationnel.

Le 6 septembre et le 4 novembre 2025, les stations détruites étaient réinstallées sur site et les derniers déchets évacués (Figure X3). Ces remplacements ont pu être réalisés grâce à un financement exceptionnel de l'INSU-CNRS de 50 000 euros complété par des fonds de l'IPGP.

On the evening of March 3, thanks to the efforts of teams on the ground—particularly at the strategic relay stations—damaged antennas were replaced and those knocked down by cyclone-force winds were reoriented. As a result, 67 % of the stations were again operational and transmitting data to the observatory.

On March 5, a helicopter-borne mission by an OVPF-IPGP team revealed the severe impact of the cyclone on the OVPF-IPGP stations located at the summit (i.e., the areas that were exposed to the strongest winds), with three stations completely destroyed, three partially damaged, and numerous solar panels and antennas destroyed (Figure X2).

On March 7, one week after the cyclone, thanks to the strong mobilization in the field and the expertise of the OVPF-IPGP teams, 83 % of the Piton de la Fournaise monitoring network was operational again.

On September 6 and November 4, 2025, the destroyed stations were reinstalled on site and the last debris was cleared away (Figure X3). These replacements were made possible thanks to exceptional funding of €50,000 from INSU-CNRS and IPGP's funds.



Figure X2 : Station de l'OVPF-IPGP détruite par le passage du cyclone Garance au sommet du Piton de la Fournaise le 28/02/2025.

OVPF-IPGP station destroyed by cyclone Garance at the summit of Piton de la Fournaise on February 28, 2025.



Figure X3 : Évacuation le 4/11/2025 des derniers déchets liés aux destructions du cyclone Garance au sommet du Piton de la Fournaise.

Evacuation on November 4, 2025, of the last debris left behind by Cyclone Garance at the summit of Piton de la Fournaise.

En savoir plus / Read more :

Les détails sur l'activité du Piton de la Fournaise 2025 sont à retrouver dans les communiqués et les bulletins mensuels de l'OVPF-IPGP / Details on the Piton de la Fournaise 2025 activity can be found in the OVPF-IPGP bulletins (ISSN 2610-5101) : <https://www.ipgp.fr/ovpf>

Au jour le jour, l'activité du Piton de la Fournaise est à retrouver dans le bulletin quotidien de l'OVPF-IPGP / Day-to-day Piton de la Fournaise activity can be found in the OVPF-IPGP daily bulletin : https://www.ipgp.fr/volcanoweb/reunion/Bulletin_quotidien/bulletin.html



■ Mayotte Mayotte

Bien que les derniers signes d'activité sous-marine observés au niveau du volcan Fani Maoré remontent à la campagne MD228-MAYOBS15 le 22/10/2020, des émissions de fluides localisées dans la zone du Fer à Cheval (structure préexistante à Fani Maoré à 10 km des côtes de Mayotte) sont toujours en cours, ainsi qu'une activité sismique localisée entre 5 et 50 km à l'est de l'île. Cette activité fait l'objet d'une surveillance opérationnelle continue, 24h/24 et 7j/7, assurée par l'OVPF-IPGP dans le cadre des actions menées par le REVOSIMA.

Deux séismes ressentis par la population ont été enregistrés et localisés par l'OVPF-IPGP en 2025 : le 21 avril à 7h09 UTC d'une magnitude de 3.8 et le 20 juin à 17h48 UTC d'une magnitude de 3.5, localisés respectivement à 56 et 48 km de profondeur à 30 km à l'Est de Mayotte.

Entre le 11 et le 20 décembre 2025, il y a eu une intensification de l'activité sismique de type Longue Période (LP), avec 16 essaims enregistrés par l'OVPF-IPGP. Ces séismes, souvent regroupés en essaims de quelques dizaines de minutes, sont fréquemment associés à des signaux Très Longue Période (VLP), un comportement qui est habituel à Mayotte. Ces séismes, liés à des mouvements de fluides magmatiques ou à des résonances en profondeur, témoignent d'une activité dynamique dans les zones de stockage du magma, sans pour autant indiquer une remontée vers la surface. De même, ces séismes LP ont été localisés dans la zone observée depuis le début de leur observation à Mayotte, entre 25 et 40 km de profondeur, à l'est de Petite Terre.

Même si un grand nombre de séismes ont été enregistrés, ceux-ci n'ont pas été ressentis par la population. Les observations sous-marines (glider) n'ont révélé aucune anomalie dans la colonne d'eau (CO_2 , CH_4) durant la même période. Il est cependant possible qu'un décalage temporel puisse exister entre les séismes profonds et d'éventuelles émissions de fluides.

Campagnes de mesures à terre et en mer

Quatre campagnes de mesures in situ ont été organisées en 2025 pour assurer le suivi régulier de l'activité de dégazage d'origine volcanique sur Petite Terre. Ces missions ont permis l'acquisition de données d'imagerie et de chimie. En 2025, les émissions de gaz à terre se sont poursuivies sur les sites déjà identifiés et les flux sont comparables aux années précédentes. De légers changements dans la signature chimique des gaz (composition isotopique) suggèrent une augmentation de la contribution d'une source mantellique profonde, sans que cela traduise une évolution notable de l'activité à ce stade.

Although the last underwater activity observed at the Fani Maoré volcano dates back to October 22, 2020 during the MD228-MAYOBS15 campaign, local fluid emissions in the Fer à Cheval area (pre-existing structure at Fani Maoré located 10 km off the coast of Mayotte) are still ongoing, and a seismic activity located between 5 and 50 km to the east of the island. Operational monitoring of this activity is carried out continuously, 24/7, by OVPF-IPGP as part of the actions conducted under REVOSIMA (Mayotte Volcanological and Seismological Monitoring Network).

Two earthquakes felt by the population were recorded and located by OVPF-IPGP in 2025: on April 21 at 7:09 UTC with a magnitude of 3.8 and on June 20 at 5:48 p.m. UTC with a magnitude of 3.5, located at depths of 56 and 48 km, respectively, 30 km east of Mayotte.

Between December 11 and 20, 2025, there was an intensification of Long Period (LP) seismic activity, with 16 swarms recorded by OVPF-IPGP. These earthquakes, often grouped in swarms lasting several tens of minutes, are frequently associated with Very Long Period (VLP) signals, which is typical behavior in Mayotte. These earthquakes, linked to magma fluid movements or deep resonances, indicate dynamic activity in the magma storage areas, without necessarily indicating a rise to the surface. Similarly, these LP earthquakes have been located in the area observed since the beginning of their observation in Mayotte, between 25 and 40 km deep, east of Petite Terre.

Even if a large number of earthquakes have been recorded, these have not been felt by the population. Underwater observations (glider) revealed no anomalies in the water column (CO_2 , CH_4) during the same period. However, it is possible that there may be a time lag between deep earthquakes and possible fluid emissions.

Land and sea measurement campaigns

In 2025, four in situ measurement campaigns were conducted to regularly monitor volcanic degassing activity on Petite Terre. These missions allowed for the collection of both imaging and chemical data. Throughout the year, gas emissions persisted at previously identified land sites, with flux levels remaining comparable to those of previous years. Minor changes in the chemical signature of the gases—specifically in their isotopic composition—suggest an increased contribution from a deep mantle source. However, these changes do not indicate any significant shift in volcanic activity at this stage.



En 2025, le REVOSIMA a organisé deux campagnes en mer pour la surveillance de l'activité sismo-volcanique à Mayotte dans lesquelles l'IPGP était fortement impliqué et notamment en tant que chef de mission sur ces deux campagnes.

- l'une à bord du patrouilleur austral des TAAF Osiris II du 13 au 16 mai 2025 (MAYOBS32). Cette campagne a permis la relève, la maintenance et le redéploiement des sismomètres de fond de mer courte-période (SP-OBS) qui renforcent et complètent le réseau sismique à terre.
- l'autre à bord du navire océanographique Marion Dufresne II du 25 septembre au 14 octobre 2025 (MAYOBS33). Cette mission a permis, entre autres, d'assurer le suivi des émissions de fluides dans la colonne d'eau, d'identifier et localiser les sites d'émission de fluide sur le fond-marin au niveau de la zone du Fer à cheval (Figure Y1), d'effectuer des prélèvements (eau et roches), de récupérer les données géophysiques et d'assurer le maintien opérationnel des capteurs des différents réseaux sous-marins de surveillance (relève, maintenance et re-déploiement), l'intercalibration des capteurs géochimiques sur le glider autonome temps réel avec les capteurs de la CTD-Rosette qui assure un suivi de la chimie de la colonne d'eau pendant les campagnes océanographiques.

Les données bathymétriques n'ont montré aucune évolution morphologique majeure dans la zone du volcan Fani Maoré ou dans la zone du Fer à Cheval. L'analyse des données acquises sur les émissions de gaz dans le Fer à Cheval a permis d'identifier sans ambiguïté la continuité de l'activité d'émission de fluides de 17 sites (sur 23) déjà observés lors des campagnes antérieures. Aucun nouveau panache excentré hors du Fer à Cheval n'a pu être identifié mais certains sites ont augmenté leur activité avec des panaches qui remontent jusqu'à 150 m de la surface et d'autres qui ont pris de l'ampleur. Un des objectifs de la campagne MAYOBS33 était également de poursuivre la promotion et la contribution à des projets pédagogiques, en intégrant des étudiants à la campagne. Cela a inclus la participation de quatre étudiant-e-s

In 2025, the REVOSIMA organized two sea campaigns to monitor seismo-volcanic activity in Mayotte, in which the IPGP was heavily involved including as mission chief on both campaigns.

- From May 13 to 16, 2025 (MAYOBS32): the TAAF southern patrol vessel Osiris II was used to relieve, maintain and redeploy the ocean bottom seismometers (OBS), which reinforce the onshore seismic network.
- From September 25 to October 14, 2025 (MAYOBS33, Figure Y1), a monitoring campaign was carried out on board the oceanographic vessel Marion Dufresne. The mission included monitoring fluid emissions into the water column, identifying and locating fluid emission sites on the ocean bottom in the Fer à Cheval area, taking samples (water, rocks), recovering geophysical data and keeping the various underwater monitoring networks and their sensors operational, and insuring the intercalibration of geochemical sensors on the real-time autonomous glider with CTD-Rosette sensors, which monitor the chemistry of the water column during oceanographic campaigns.

The bathymetric data showed no major morphological changes in the area of the Fani Maoré volcano or in the Fer à Cheval zone. Analysis of the data collected on gas emissions in the Fer à Cheval area clearly identified the ongoing fluid emission activity at 17 sites (out of 23) previously observed during earlier campaigns. No new off-center plumes outside the Fer à Cheval were detected, but some sites showed increased activity, with plumes rising up to 150 meters from the surface and others expanding in scale. One of the objectives of the MAYOBS33 campaign was also to continue promoting and contributing to educational projects by involving students in the campaign. This included the participation of four students from the

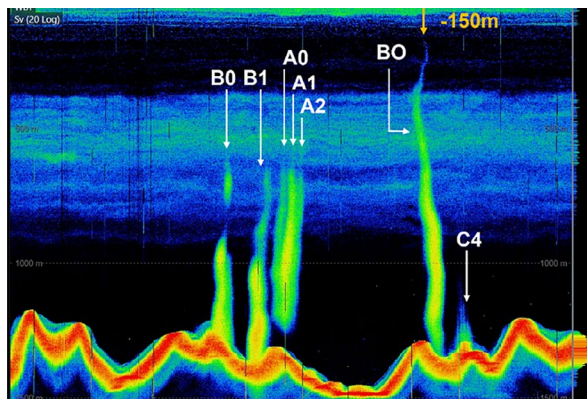


Figure Y1 : Echogramme de panache de fluide au niveau du Fer à Cheval. Capture d'écran du sondeur monofaisceau EK180 (données brutes) montrant le long d'un profil au niveau du Fer à Cheval les panaches B0, B1, A0, A1, A2 et C4. Le panache B0 a atteint la profondeur record de -150 m sous la surface de l'océan en date du 06-10-2025 lors de la campagne MD248-MAYOBS33.

Figure Y1: Echogram of fluid plume at Fer à Cheval. Screenshot of the EK180 single-beam echo sounder (raw data) showing the B0, B1, A0, A1, A2, and C4 plumes along a profile at Fer à Cheval. The B0 plume reached a record depth of -150 m below the ocean surface on October 6, 2025, during the MD248-MAYOBS33 campaign.



de l'Université de Mayotte et leur encadrant, d'une Université Flottante avec dix étudiant-e-s et leur encadrant, ainsi que de deux étudiantes de l'Université de La Réunion.

Remise en état du réseau de surveillance suite au cyclone Chido

Suite au passage du cyclone intense Chido sur l'île de Mayotte le 14 décembre 2024 qui a dévasté l'île avec une ampleur sans précédent, plusieurs stations du réseau de surveillance du REVOSIMA avaient été endommagées et détruites.

En 2025, l'OVPF-IPGP a entrepris la réparation des stations du REVOSIMA opérées par l'IPGP, grâce à un financement exceptionnel de l'INSU-CNRS de 50 000 euros et à une priorisation d'une partie du budget REVOSIMA 2025 vers la remise en état des réseaux de mesure.

Ainsi en mai 2025, trois stations sismologiques qui avaient été endommagées ont pu être remises en état permettant de retrouver un réseau opérationnel tel qu'il était avant le passage du cyclone (Figure Y2).

University of Mayotte and their supervisor, ten students and their supervisor from a floating university, and two students from the University of Réunion.

Rehabilitation of the monitoring network following cyclone Chido

During the intense Cyclone Chido, which hit the island of Mayotte on December 14, 2024, causing unprecedented devastation, several stations of the REVOSIMA monitoring network were damaged or destroyed.

In 2025, the OVPF-IPGP repaired the REVOSIMA stations operated by the IPGP, thanks in particular to exceptional funding of €50,000 from the INSU-CNRS and prioritizing part of the REVOSIMA 2025 budget for the repair of measurement networks.

In May 2025, three damaged seismological stations were repaired, restoring the network to its pre-cyclone operational status (Figure Y2).



Figure Y2 : Réparation d'une station sismologique détruite par le passage du cyclone Chido.

Figure Y2: Repair of a seismological station destroyed by cyclone Chido



La plateforme de surveillance du lac Dziani qui avait été renversée pendant le cyclone a pu être retournée et ramenée sur le rivage pour diagnostic en novembre 2025 (Figure Y3). Sa reconstruction est prévue pour 2026 et sa ré-installation pour 2027.

The Dziani Lake monitoring platform, which had been knocked over during the cyclone, was able to be turned over and brought back to shore for diagnosis in November 2025 (Figure Y3). Its reconstruction is planned for 2026 and its replacement for 2027.



Figure Y3 : Retournement de la plateforme de surveillance du lac Dziani par les équipes de l'OVPF-IPGP et de l'IPGP.

Figure Y3: OVPF-IPGP and IPGP teams turning over the Dziani Lake monitoring platform.



Focus sur la journée de la Résilience

Le 5 octobre 2025 s'est tenue la 4^{ème} édition de la Journée Nationale de la Résilience à Mayotte en écho à la journée internationale pour la réduction des risques de catastrophes de l'Organisation Internationale des Nations Unies.

Cette journée s'inscrivait dans la volonté du gouvernement français de développer la culture du risque sur l'ensemble du territoire. Tous les risques menaçant Mayotte y ont été abordés par les acteurs institutionnels, scientifiques et associatifs, dont le risque volcanique avec notamment un stand du REVOSIMA.

À cette occasion, le Marion Dufresne II a fait escale dans le lagon de Mayotte, au milieu de la campagne océanographique de surveillance. Cela a permis aux étudiants de l'Université de Mayotte ainsi qu'à plusieurs chercheurs, post-doctorants et ingénieurs de l'IPGP de participer à l'animation du stand ou à des conférences grand public (Figure Y4). Au total, plus de 250 personnes sont venues visiter les stands et échanger avec les scientifiques.

Focus on Resilience Day

On October 5, 2025, the 4th edition of National Resilience Day was held in Mayotte, echoing the International Day for Disaster Risk Reduction of United Nations.

This day was part of the French government's commitment to developing a culture of risk awareness throughout the country. All the risks threatening Mayotte were addressed by institutional, scientific, and associative actors, including volcanic risk, with a stand set up by REVOSIMA.

On this occasion, the Marion Dufresne II stopped off in the lagoon of Mayotte, in the middle of its oceanographic campaign. This enabled students from the University of Mayotte as well as several researchers and post-doctoral fellows from IPGP to participate in animating the stand and giving conferences for the general public (Figure Y4). In total, more than 250 people visited the stands and exchanged ideas with the scientists.



Figure Y4 : Stand REVOSIMA et conférence lors de la Journée Nationale de la Résilience à Mayotte le 5 octobre 2025.

Figure Y4: REVOSIMA stand and conference during National Resilience Day in Mayotte on October 5, 2025.

En savoir plus / Read more :

Les détails sur l'activité de Mayotte 2025 sont à retrouver dans les communiqués et les bulletins mensuels de du REVOSIMA / Details on the Mayotte 2025 activity can be found in the REVOSIMA bulletins (ISSN 2680-1205) :

<https://www.ipgp.fr/actualites-du-revosima/>

Au jour le jour, l'activité de Mayotte est à retrouver dans le bulletin quotidien du

REVOSIMA / Day-to-day Mayotte activity can be found in the REVOSIMA daily bulletin :

https://www.ipgp.fr/volcanoweb/mayotte/Bulletin_quotidien/bulletin.html



■ La Soufrière de Guadeloupe The Soufrière of Guadeloupe

L'année 2025 a été marquée par une stabilisation de l'équipe OVSG-IPGP, après le recrutement de Julien Novar comme ingénieur d'étude en instrumentation sur un support permanent CNRS, et la titularisation d'Elodie Chilin, ingénieure d'étude en analyse chimique CNRS. Au 01/12/2025 l'équipe de l'OVSG-IPGP comptait 10 agents.

La Guadeloupe et sa région ont connu en 2025 une activité sismique soutenue : l'OVSG-IPGP a enregistré plus de 3 090 séismes volcaniques sous La Soufrière de Guadeloupe, incluant cinq essaims sismiques, et 2 232 séismes tectoniques régionaux, dont 1 165 (61.5 %) ont pu être localisés. La détection et la caractérisation des petits séismes ont été améliorées grâce à l'installation en forage de stations sismiques à bas bruit de fond en 2024 (Savane l'Étang, Parnasse et Savane à Mulet). Cette activité tellurique a été l'objet de 5 communiqués relatifs à la sismicité volcanique et 11 communiqués relatifs à des séismes tectoniques ressentis en Guadeloupe et dans les îles du Nord.

L'année 2025 a été marquée par un séisme de magnitude 6.6 enregistré le lundi 27 octobre 2025 à 8h38 (heure locale) et localisé à 168 km à l'Est de La Désirade, à 32 km de profondeur. Plusieurs centaines de répliques ont suivi ce séisme (dont 352 localisées). Le même jour, trois de ces répliques ont été ressenties et ont fait l'objet d'un communiqué : à 8h46 à 144 km à l'Est de La Désirade, à moins de 1 km de profondeur et de magnitude 4.9 ; à 8h55 localisée à 163 km à l'Est de La Désirade, à 32 km de profondeur, de magnitude 6.2 ; à 9h26 localisée à 167 km à l'Est de La Désirade, à 32 km de profondeur, de magnitude 5.4.

Le volcan de La Soufrière a montré en 2025 une activité hydrothermale toujours très soutenue et un régime globalement comparable à celui observé ces dernières années. On note cependant une nette diminution de l'activité sismique avec seulement 3 090 séismes volcano-tectoniques pour un total d'énergie sismique libérée de 11 MJ, revenant à l'énergie sismique libérée par un seul séisme de magnitude 1.5. L'étude des répéteurs montre une tendance similaire avec une diminution d'environ 62 % de l'énergie sismique libérée par rapport à 2024 (2644 VT comptabilisés en 2025 contre 7034 VT en 2024).

Contrairement à la sismicité, le régime de déformation montre que le dôme de la Soufrière poursuit ainsi son inflation de façon remarquablement lente et continue depuis plusieurs années. À l'échelle de l'édifice, les

The year 2025 was marked by the stabilization of the OVSG-IPGP team, following the recruitment of Julien Novar as an instrumentation engineer on a permanent CNRS position, and the tenure of Elodie Chilin as a CNRS research engineer in chemical analysis. As of 1 December 2025, the OVSG-IPGP team comprised ten staff members.

Guadeloupe and the surrounding region experienced sustained seismic activity throughout 2025. OVSG-IPGP recorded more than 3,090 volcanic earthquakes beneath La Soufrière de Guadeloupe, including five seismic swarms, as well as 2,232 regional tectonic earthquakes, of which 1,165 (61.5 %) were successfully located. Detection and characterization of low-magnitude events were significantly improved following the installation of low-noise borehole seismic stations in 2024 (Savane l'Étang, Parnasse, and Savane à Mulet). This tectonic and volcanic activity resulted in five official communications related to volcanic seismicity and eleven communications concerning felt tectonic earthquakes in Guadeloupe and the Northern Islands.

The year was notably marked by a magnitude 6.6 earthquake recorded on Monday, 27 October 2025, at 08:38 local time, located 168 km east of La Désirade at a depth of 32 km. Several hundred aftershocks followed (including 352 located events). On the same day, three of these aftershocks were felt and prompted official communications: at 08:46, a magnitude 4.9 event at less than 1 km depth, 144 km east of La Désirade; at 08:55, a magnitude 6.2 event at 32 km depth, 163 km east of La Désirade; and at 09:26, a magnitude 5.4 event at 32 km depth, 167 km east of La Désirade.

In 2025, La Soufrière volcano exhibited sustained hydrothermal activity, broadly consistent with levels observed in recent years. However, a marked decrease in seismic activity was observed, with 3,090 volcano-tectonic events corresponding to a total released seismic energy of approximately 11 MJ, equivalent to that of a single magnitude 1.5 earthquake. Analysis of repeating earthquakes shows a similar trend, with a ~62 % decrease in released seismic energy compared to 2024 (2,644 VT events in 2025 versus 7,034 in 2024).

In contrast to seismicity, deformation data indicate that the lava dome continues a remarkably slow and continuous inflation, ongoing for several years. At the edifice scale, data



Ravine Goyavier



Ravine Marchand

Suivi des sources thermales sur les flancs de la Soufrière. gauche : ravine Goyavier (© Paul BARRET), droite : ravine Marchand (@ Jonathan Lao).
Monitoring of thermal springs on the flanks of La Soufrière. Left: Goyavier ravine (© Paul Barret); right: Marchand ravine (© Jonathan Lao).

données des 12 derniers mois montrent une déformation horizontale radiale du sommet du volcan. La déformation du dôme est également caractérisée par un phénomène d'ouverture de certaines fractures radiales (Napoléon/8 juillet 1976) simultanément à la fermeture d'autres fractures (Fente du Nord, Lacroix, Dolomieu, 30 août). Cette déformation est cohérente avec une source de pression en augmentation constante et très superficielle, située à environ 200 mètres sous le plateau sommital, entre le Tarissan et le Cratère Sud. Cette source correspond très probablement à la surpression du réservoir de fluides hydrothermaux à l'origine des manifestations fumeroliennes de surface. Précisons qu'à l'échelle de la zone du sud de Basse-Terre, les déformations mesurées par GNSS, ne montrent pas de gonflement qui pourrait traduire l'apport de magma en profondeur.

En 2025, l'activité fumerolienne s'est étendue vers l'est-sud-est du dôme de la Soufrière. Cette extension s'est traduite par l'apparition d'une zone importante de dégradation de la végétation qui s'est développée entre le Gouffre 56 et le site Napoléon est, et par l'apparition de plusieurs fumerolles à proximité et sur la trace des géologues en contre bas du Gouffre Hammouya. Ces fumerolles ainsi qu'une grande majorité présente au sommet sont à environ 95°C. Cependant, la température de la fumerolle Cratère Sud Sud (CSS), localisée dans le périmètre d'interdiction à l'intérieur du périmètre de sécurité (arrêté n° 2024-010/CAB/SIDPC du 02 mai 2024) s'est

from the past 12 months show radial horizontal deformation of the summit. Dome deformation is also characterized by the opening of certain radial fractures (Napoléon / 8 July 1976) simultaneously with the closure of others (Fente du Nord, Lacroix, Dolomieu, August 30, 1976). This deformation pattern is consistent with a shallow and steadily increasing pressure source located approximately 200 meters beneath the summit plateau, between the Gouffre Tarissan and the Cratère Sud. This source most likely corresponds to overpressure within the hydrothermal fluid reservoir feeding surface fumarolic activity. It is important to note that, at the scale of southern Basse-Terre, GNSS measurements show no inflation that would indicate magma intrusion at depth.

Fumarolic activity expanded in 2025 toward the east-south-east sector of the dome. This extension was evidenced by the development of a large vegetation die-off zone between Gouffre 56 and the Napoléon East site, as well as the appearance of several new fumaroles near and along the "Trace des Géologues" below Gouffre Hammouya. Most fumaroles, including those at the summit, exhibit temperatures around 95°C. However, the Cratère Sud Sud (CSS) fumarole, located within the restricted access zone established by prefectural decree (N°. 2024-010/CAB/SIDPC, 2 May 2024), maintained temperatures



maintenue dans la zone des 200°C tout au long de l'année, avec un maximum de 224°C atteint au mois de septembre. Notons que les températures de la fumerolle Cratère Sud Nord (CSN), localisée à proximité de CSS, ont poursuivi leur augmentation pour atteindre 182°C également mesurée au mois de septembre. L'observation de plusieurs effondrements (fracture Napoléon, Gouffres Dupuy et G56) montre que cette activité fumerolienne importante a un impact sur la stabilité des parois et flancs des gouffres et fractures au sommet de la Soufrière. Dans ce secteur le plus actif de La Soufrière, le déséquilibre entre le flux de chaleur profond et la quantité d'eau disponible dans le système hydrothermal perdure donc depuis 2023. Ce déséquilibre perdure malgré une pluviométrie en augmentation au sommet de La Soufrière (4621 mm à la Station Piton Sanner contre 3741 mm en 2024). Les températures et pression d'équilibre des gaz de la fumerolle Napoléon Nord ont poursuivi leur diminution, se rapprochant des conditions de surface. En accord avec les dernières tomographies électriques du dôme et une faible sismicité en 2025, cette évolution pourrait refléter un système hydrothermal en expansion, plus ouvert vers la surface dans la partie Nord et Est du dôme, où l'activité fumerolienne et l'anomalie thermique du sol se sont étendues et ont augmenté ces dix dernières années. Les sources thermales situées en altitude sur le flanc sud de la Soufrière ont poursuivi leur montée en température débutée il y a plus de 25 ans, appuyant un réchauffement lent mais continu du système hydrothermal de la Soufrière. Malgré ces tendances, il est important de souligner que les données de gaz inertes indiquent qu'il ne se produit pas de changement majeur de la composition des gaz profonds qui pourrait traduire une remontée de magma.

Dans ces conditions, le niveau d'alerte volcanique a été maintenu au niveau de vigilance jaune. Au vu de l'augmentation de l'activité fumerolienne au sommet du volcan, la préfecture de Guadeloupe maintient l'arrêté réglementant l'accès aux zones actives, qui a mis en place un périmètre d'interdiction à l'intérieur du périmètre de sécurité en 2024 (arrêté n° 2024-010/CAB/SIDPC du 02 mai 2024).

Face à cette évolution rapide de l'activité fumerolienne, la surveillance thermique du volcan est devenue prioritaire pour (1) contribuer à la sécurité des centaines de milliers de personnes qui visitent le volcan chaque année, et (2) évaluer la réactivation du système magmatique en profondeur. Dans ce contexte et dans le cadre d'une convention avec le Ministère de la Transition Ecologique (MTE), l'OVSG-IPGP travaille au développement d'un réseau de capteurs thermiques avec de nouvelles technologies et d'une surveillance en temps réel de l'activité au sommet et sur les flancs du dôme, tout en sécurisant les flux de données gérés par les serveurs de l'OVSG.

around 200°C throughout the year, reaching a maximum of 224°C in September. The nearby South Crater North (CSN) fumarole also continued to heat up, reaching 182°C in September. Observations of multiple collapses (Napoléon fracture, Gouffre Dupuy and Gouffre G56) indicate that intense fumarolic activity is affecting the stability of crater walls and fracture systems at the summit. In this most active sector, the imbalance between deep heat flux and available water within the hydrothermal system has persisted since 2023, despite increased rainfall at the summit (4,621 mm recorded at Piton Sanner station versus 3,741 mm in 2024). Gas temperature and pressure equilibrium measurements at the Napoléon Nord fumarole continued to decrease, approaching surface conditions. Combined with recent electrical resistivity tomography results and low seismicity in 2025, this evolution suggests an expanding hydrothermal system, increasingly open toward the surface in the northern and eastern sectors of the dome, where fumarolic activity and soil thermal anomalies have intensified over the past decade.

Thermal springs located at high elevation on the southern flank of La Soufrière have continued their long-term warming trend, ongoing for more than 25 years, supporting the hypothesis of a slow but continuous heating of the hydrothermal system. Despite these trends, inert gas analyses indicate no significant change in deep gas composition that would suggest magma ascent.

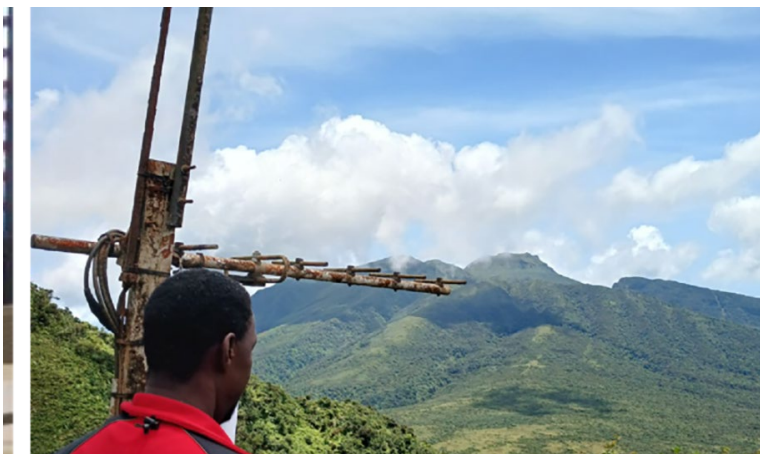
Under these conditions, the volcanic alert level remained at "yellow vigilance." In light of the intensification of fumarolic activity at the summit, the Guadeloupe Prefecture maintained the access restrictions to active zones established in 2024.

In response to the rapid evolution of fumarolic activity, thermal monitoring of the volcano has become a priority to (1) ensure the safety of the hundreds of thousands of visitors to the site each year, and (2) assess potential reactivation of the deep magmatic system. Within the framework of an agreement with the French Ministry for Ecological Transition, OVSG-IPGP is developing a network of thermal sensors based on new technologies, along with real-time monitoring of activity at the summit and along the dome flanks, while securing data flows managed by the observatory's servers.



Deux stations embarquant chacune une mesure thermique (caméra infrarouge) et optique (appareil photo) ont été conçues en collaboration avec l'Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand (OPGC), qui détient une expérience de ce type d'installation. Une première station a été conçue avec un angle de vue large pour être installée au sommet de la Soufrière (site de la Découverte) et observer de près la zone fumerolienne active au milieu du dôme (gouffre Tarissan, gouffre Dupuy, fracture Napoléon, et nouvelle zone active se développant au nord et à l'est de la fracture Napoléon). La seconde station a été conçue avec un angle de vue plus étroit pour être installée au sommet du cône volcanique de l'Échelle situé à 800 m à l'est de La Soufrière, et observer le développement de l'activité fumerolienne sur le flanc sud et est de la Soufrière (gouffre 56, gouffre Breislack, gouffre Hammouya, fracture Cratère Sud, faille du 30 Aout 1976).

Two monitoring stations, each equipped with both thermal (infrared camera) and optical (camera) sensors, were developed in collaboration with the OPGC, which has extensive experience in such installations. The first station, designed with a wide field of view, is intended for deployment at the summit (La Découverte site) to monitor the central active fumarolic zone (Gouffre Tarissan, Gouffre Dupuy, Napoléon fracture, and the emerging active areas to the north and east). The second station, with a narrower field of view, is designed for installation on the Échelle volcanic cone, located 800 m east of La Soufrière, to monitor fumarolic activity on the southern and eastern flanks (Gouffre 56, gouffre Breislack, gouffre Hammouya, Cratère Sud, and the August 30, 1976 fault).



Haut : finalisation de l'installation en forage d'une station sismique à bas bruit de fond à Savane à Mulet, février 2025 ; bas gauche : formation « habilitation électrique » en janvier 2025 de l'équipe de l'OVSG. Formation à l'intervention sur un tableau électrique ; bas droite : vue sur la Soufrière depuis la station Sans-Toucher, septembre 2025 (STG).

Top: completion of the installation, in a borehole, of a low-background seismic station at Savane à Mulet, February 2025; bottom left: "electrical accreditation" training for the Observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe team in January 2025, including intervention procedures on an electrical panel; bottom right: view of La Soufrière from the Sans-Toucher station (STG), September 2025.



À l'image de toutes les stations de l'OVSG et avec les technologies développées depuis plusieurs décennies, les stations sont autonomes en énergie (alimentées par des batteries couplées à des panneaux solaires) et télémetrées via une liaison wifi avec l'observatoire. Également avec le soutien du MTE, l'observatoire a poursuivi la mise à jour en profondeur de ses serveurs informatiques, pour améliorer leur fiabilité et se munir d'outils modernes de supervision, sauvegarde, et assistance. Cette mise à jour a permis de sécuriser les échanges de données et d'information entre l'observatoire et ses partenaires extérieurs (autorités locales et nationales, partenaires scientifiques nationaux et internationaux). Elle permet également une plus grande sécurité dans le partage des données sensibles et l'appui à distance des scientifiques de l'IPGP en cas de crise sismique ou volcanique d'ampleur.

As with all OVSG stations, these systems are energy-autonomous (battery-powered with solar panels) and transmit data via Wi-Fi telemetry to the observatory. With additional support from the Ministry for Ecological Transition, the observatory has also undertaken a comprehensive upgrade of its IT infrastructure, enhancing system reliability and deploying modern tools for monitoring, backup, and technical support. This upgrade has strengthened the security of data exchange between the observatory and its partners (local and national authorities, as well as national and international scientific collaborators), and improves the capacity for remote scientific support in the event of major seismic or volcanic crises.



■ La Montagne Pelée à la Martinique Mount Pelée in Martinique

En Martinique, l'année 2025 a été marquée par une activité tellurique volcanique et régionale particulièrement soutenue comparativement aux années précédentes.

Concernant la Montagne Pelée, l'OVSM-IPGP documente depuis 2019 une phase de réactivation caractérisée par l'augmentation de plusieurs observables de l'activité du volcan (Fontaine *et al.*, 2025) ayant conduit la préfecture de Martinique à élever en décembre 2020 le niveau d'alerte volcanique au niveau jaune-vigilance ; niveau qui est toujours en cours aujourd'hui.

Après une période de relative quiescence entre 2022 et 2024, l'activité sismique d'origine volcanique s'est nettement intensifiée en 2025. Avec plus de 14 000 événements détectés par l'OVSM-IPGP, l'année 2025 constitue un record historique en termes de nombre annuel de séismes dans le catalogue de l'observatoire. Cette activité a principalement débuté en avril-mai 2025 avec, en particulier, la survenue d'un essaim d'une cinquantaine de séismes profonds, de type longue-période et hybride, localisés entre 15 et 40 km de profondeur dans les environs de la Montagne Pelée (figure X1). Ces séismes profonds traduisent probablement une circulation et/ou un dégazage de fluides magmatiques au sein d'une zone de stockage profonde de magma située dans la croûte inférieure et le manteau supérieur.

À partir de juin 2025, l'OVSM a détecté un nombre croissant de séismes plus superficiels avec un pic d'activité très marqué entre fin août et mi-octobre (dont 1 015 séismes détectés sur la seule journée du 4 octobre). Cette sismicité est majoritairement composée d'évènements volcano-tectoniques (VT) localisés sous la partie sommitale à des profondeurs comprises entre -0,5 et 2,5 km par rapport au niveau de la mer, au niveau du système hydrothermal principal de la Montagne Pelée (figure X1). Plus de 400 séismes hybrides et longue-période ont également été identifiés dans la même zone, témoignant probablement d'une circulation de fluides pressurisés (gaz, fluides hydrothermaux) contribuant aux processus de micro-fracturation de l'édifice.

Les mesures de déformation par GNSS indiquent par ailleurs la reprise, depuis septembre 2025, d'une légère inflation sommitale qui avait déjà été observée entre 2021 et 2023. En revanche, les paramètres physico-chimiques des eaux échantillonnées mensuellement ne montrent pas d'évolution significative, et la superficie des zones de végétation dégradée identifiées depuis 2019 et suivies par imagerie satellitaire tend à diminuer. Grâce à un financement du MTECT, un personnel recruté à l'observatoire pour le projet a pu réaliser en 2025 une première cartographie du dégazage diffus de

In Martinique, 2025 was characterized by particularly sustained volcanic and regional seismic activity compared to previous years.

Regarding Montagne Pelée, the OVSM-IPGP has documented, since 2019, a phase of reactivation marked by increases in several observable parameters of volcanic activity (Fontaine *et al.*, 2025). This led the Martinique Prefecture to raise the volcanic alert level to yellow vigilance in December 2020, a level that remains in effect.

Following a period of relative quiescence between 2022 and 2024, volcanic seismicity intensified significantly in 2025. With more than 14,000 events detected by OVSM-IPGP, 2025 represents a historical record in terms of the annual number of earthquakes in the observatory's catalog. This activity began primarily in April–May 2025, notably with a swarm of approximately fifty deep earthquakes of long-period and hybrid types, located between 15 and 40 km depth beneath the Montagne Pelée region (Figure X1). These deep events likely reflect the circulation and/or degassing of magmatic fluids within a deep magma storage zone located in the lower crust and upper mantle.

From June 2025 onward, an increasing number of shallower earthquakes were detected, culminating in a pronounced peak in activity between late August and mid-October (including 1,015 events detected on 4 October alone). This seismicity is predominantly composed of volcano-tectonic (VT) events located beneath the summit area at depths ranging from approximately -0.5 to 2.5 km relative to sea level, within the main hydrothermal system of Montagne Pelée (Figure X1). More than 400 hybrid and long-period events were also identified in the same area, likely indicating the circulation of pressurized fluids (gas and hydrothermal fluids) contributing to micro-fracturing processes within the volcanic edifice.

GNSS deformation measurements further indicate the resumption, since September 2025, of slight summit inflation, similar to that observed between 2021 and 2023. In contrast, the physicochemical parameters of waters sampled monthly show no significant changes, and the extent of vegetation degradation zones identified since 2019 and monitored via satellite imagery appears to be decreasing. With funding from the French Ministry for Ecological Transition, a staff member recruited for the project conducted in 2025 the first mapping of diffuse soil



CO₂ par le sol dans l'environnement du volcan (figure X2), mettant en évidence plusieurs secteurs présentant des flux significativement supérieurs au dégazage biogénique.

Cette nouvelle phase d'activité dans le cadre de la réactivation de la Montagne Pelée a été analysée par le comité d'expert en volcanologie (CEV). L'OVSM-IPGP a également maintenu des échanges étroits avec l'autorité préfectorale, notamment en relation avec une révision du Dispositif Spécifique ORSEC Volcan, et a répondu à de nombreuses sollicitations médiatiques, tout en participant à différentes réunions publiques d'information organisées en collaboration avec les services de l'État et les collectivités territoriales.

Début septembre 2025, peu après l'apparition des premiers séismes longue-période au niveau du système hydrothermal du volcan, l'OVSM-IPGP a détecté de nombreux signaux sismiques de type « éboulements » au niveau de la falaise Samperre, située sur le flanc nord de la Montagne Pelée. Grâce à l'appui de l'hélicoptère Dragon972 de la Sécurité Civile, l'OVSM-IPGP a effectué des reconnaissances sur site qui ont confirmé la survenue d'importants effondrements de flancs de cette falaise. Une partie des matériaux a été remobilisée sous la forme de coulées de débris (lahars) dans la rivière du Prêcheur qui ont été détectés par le système de surveillance et d'alerte opéré par l'OVSM-IPGP. Le lahar le plus important a eu lieu le 16 septembre 2025 et a significativement endommagé le système pendulaire de la station RPRE. Même si les effondrements se sont significativement réduits ces derniers mois, le risque de nouveaux lahars reste important.

Concernant l'activité tectonique régionale, l'OVSM a détecté 2 043 séismes d'origine tectonique durant l'année 2025 dont 1 272 ont pu être localisés. Quinze d'entre eux ont été ressentis par la population en Martinique, alors que la moyenne annuelle sur les derniers 25 ans est d'environ neuf séismes ressentis par an.

Une activité crustale à terre plus importante qu'à l'accoutumée a été enregistrée au premier trimestre 2025 principalement le long d'un axe sud-ouest-nord-est entre Les Anses-d'Arlet et Sainte-Marie : sur les 31 séismes détectés dans ce secteur, quatre ont été légèrement ressentis, avec une magnitude maximale de 3,1.

Par ailleurs, le séisme régional le plus important de l'année, de magnitude 6,6, survenu le 27 octobre à environ 160 km au large de la Guadeloupe a également été largement ressenti en Martinique avec une intensité maximale de IV (Échelle EMS-98). Près de 700 répliques de ce séisme ont ensuite été identifiées par l'OVSM-IPGP (la plus forte, de magnitude 6,2, ayant également été ressentie).

CO₂ degassing in the volcanic environment (Figure X2), highlighting several areas with fluxes significantly exceeding biogenic background levels.

This new phase of activity associated with the reactivation of Montagne Pelée was assessed by the volcanological expert committee (CEV). OVSM-IPGP also maintained close coordination with the prefectural authorities, notably in relation to the revision of the ORSEC Volcan emergency response framework, while responding to numerous media requests and participating in public information meetings organized in collaboration with state services and local authorities.

In early September 2025, shortly after the onset of long-period seismicity within the hydrothermal system, OVSM-IPGP detected numerous seismic signals associated with rockfalls along the Samperre cliff on the northern flank of Montagne Pelée. With the support of the Dragon972 Civil Security helicopter, field reconnaissance confirmed significant slope collapses. Part of the mobilized material was remobilized as debris flows (lahars) in the Rivière du Prêcheur, detected by the monitoring and alert system operated by OVSM-IPGP. The most significant lahar occurred on 16 September 2025 and caused substantial damage to the pendulum system of the RPRE station. Although the frequency of collapses has decreased in recent months, the risk of further lahars remains significant. Regarding regional tectonic activity, OVSM detected 2,043 tectonic earthquakes in 2025, of which 1,272 were successfully located. Fifteen of these events were felt by the population in Martinique, compared to an average of approximately nine felt earthquakes per year over the past 25 years.

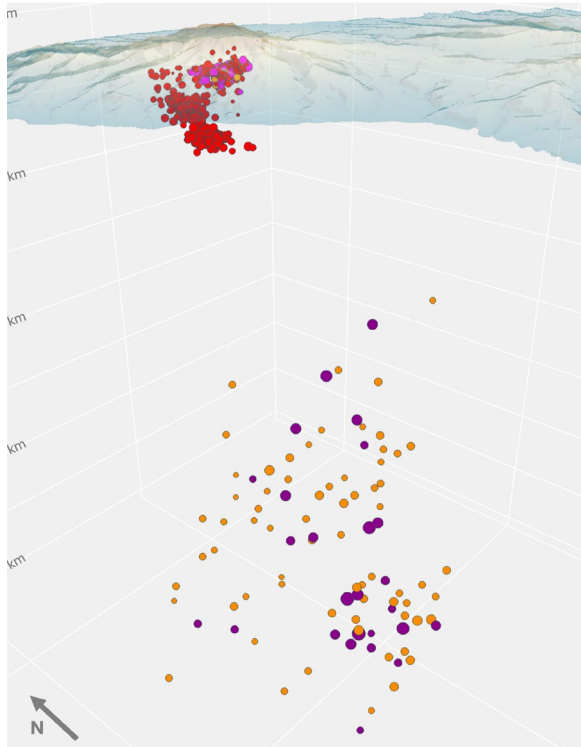
An unusually elevated level of onshore crustal seismicity was recorded during the first quarter of 2025, primarily along a southwest-northeast axis between Les Anses-d'Arlet and Sainte-Marie. Of the 31 earthquakes detected in this area, four were slightly felt, with a maximum magnitude of 3.1.

In addition, the largest regional earthquake of the year, with a magnitude of 6.6, occurred on 27 October approximately 160 km east of Guadeloupe and was widely felt in Martinique, with a maximum intensity of IV (EMS-98 scale). Nearly 700 after-shocks were subsequently identified by OVSM-IPGP, including a magnitude 6.2 event that was also felt.



Au-delà de ses activités d'observation et de surveillance, l'OVSM-IPGP s'est également investi durant l'année 2025 dans différents projets de recherche structurants. L'ensemble de l'équipe de l'observatoire a ainsi participé, dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise TLS-Geothermics, au déploiement d'un réseau temporaire de 500 stations sismiques miniaturisées (« nodes ») couvrant l'ensemble du territoire martiniquais pendant un mois. L'exploitation en cours et à venir de ce jeu de données exceptionnel permettra de mieux caractériser la structure crustale en 3D de la Martinique et mieux définir les structures associées à l'activité tectonique et volcanique du territoire. L'OVSM-IPGP a également poursuivi son implication dans différents axes du PEPR Risques (IRiMa), notamment à travers le développement de stations multi-instrumentées en forage (au sein du projet ciblé « Risques Outre-Mer ») et le démarrage de la chaire « Culture et médiation des risques » du projet ciblé « COCHAIR ».

Beyond its monitoring and surveillance missions, OVSM-IPGP was actively involved in several major research initiatives in 2025. In collaboration with the company TLS-Geothermics, the observatory deployed a temporary network of 500 miniaturized seismic stations (“nodes”) across the entire territory of Martinique for one month. The ongoing and future analysis of this exceptional dataset will enable improved characterization of the island's 3D crustal structure and a better understanding of tectonic and volcanic structures. OVSM-IPGP also continued its involvement in several research axes of the PEPR Risques (IRiMa) program, notably through the development of multi-parameter borehole stations (within the targeted project “Risques Outre-Mer”) and the launch of the “Culture and Risk Mediation” chair under the “COCHAIR” targeted project.



Vue 3D de la sismicité d'origine volcanique au niveau de la Montagne Pelée (Martinique) enregistrée et localisée par l'OVSM-IPGP au cours de l'année 2025. La couleur des symboles indique le type de séisme (rouge = volcano-tectonique ; orange clair = longue-période superficiel ; orange foncé = longue-période profond ; rose = hybride superficiel ; violet = hybride profond)

3D view of volcanic seismicity at Montagne Pelée (Martinique) recorded and located by OVSM-IPGP in 2025. Symbol colors indicate earthquake types (red: volcano-tectonic; light orange: shallow long-period; dark orange: deep long-period; pink: shallow hybrid; purple: deep hybrid).

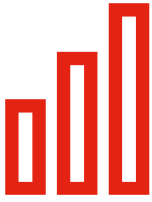


Mesure du flux de CO₂ au sol réalisée sur le sentier menant au sommet de la Montagne Pelée par Tracy Abauzit, assistante-ingénieure à l'OVSM-IPGP financée sur contrat par le MTECT.

Measurement of soil CO₂ flux along the trail leading to the summit of Montagne Pelée, carried out by Tracy Abauzit, assistant engineer at OVSM-IPGP funded by the Ministry for Ecological Transition.

En savoir plus / Read more :

OVPF-IPGP : ipgp.fr/ovpf | **REVOSIMA** : ipgp.fr/revosima | **OVSIG-IPGP** : ipgp.fr/ovsig | **OVSM-IPGP** : ipgp.fr/ovsm



Centre de données IPGP IPGP data center

Le Centre de données de l'IPGP (CD-IPGP, <https://datacenter.ipgp.fr>) a pour mission de collecter, gérer, préserver et diffuser les données produites par les observatoires et les activités de recherche de l'Institut de physique du globe de Paris. En garantissant un accès ouvert, fiable et pérenne à ces données, il contribue activement au soutien de la recherche et de l'observation en sciences de la Terre aux niveaux national et international.

Le CD-IPGP assure l'archivage, la conservation à long terme et la mise à disposition des données d'observation et de recherche, en s'appuyant sur des formats et des interfaces conformes aux standards internationaux en vigueur. Il veille également à l'interopérabilité de ses services avec différentes infrastructures de données, qu'elles soient nationales (Epos-France, FormaTerre), européennes (EPOS) ou internationales (FDSN, Planetary Data System de la NASA).

Enfin, le Centre de données est chargé de l'attribution et de la gestion d'identifiants numériques pérennes (DOI – Digital Object Identifier) pour les réseaux, les jeux de données et les produits associés. Cette politique garantit la traçabilité des données, facilite leur citation et renforce leur intégration dans l'écosystème de la science ouverte.

Le CD-IPGP assure la gestion et la diffusion des données issues de sept réseaux d'observation, couvrant un large éventail de domaines disciplinaires tels que la sismologie, la géodésie et la volcanologie. Ces données sont produites et transmises au Centre de données par les infrastructures et observatoires suivants :

- **l'Observatoire GEOSCOPE** : réseau global de stations sismologiques large bande ;
- **l'Observatoire volcanologique et sismologique de la Guadeloupe** : réseau de stations sismologiques, accélérométriques, volcanologiques et GNSS ;
- **l'Observatoire volcanologique et sismologique de la Martinique** : réseau de stations sismologiques, accélérométriques, volcanologiques et GNSS ;
- **l'Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise** : réseau de stations sismologiques, volcanologiques et GNSS ;

The IPGP Data Center (IPGP-DC, <https://datacenter.ipgp.fr>) has the mission of collecting, managing, preserving, and disseminating data produced by the observatories and research activities of the Institut de physique du globe de Paris. By ensuring open, reliable, and long-term access to these data, it actively supports research and observation in Earth sciences at both national and international levels.

The IPGP-DC is responsible for the archiving, long-term preservation, and dissemination of observation and research data, relying on formats and interfaces that comply with current international standards. It also ensures the interoperability of its services with various data infrastructures, whether national (Epos France, FormaTerre), European (EPOS), or international (FDSN, NASA's Planetary Data System).

Finally, the Data Center is in charge of assigning and managing persistent digital identifiers (DOI – Digital Object Identifier) for networks, datasets, and associated products. This policy guarantees data traceability, facilitates citation, and strengthens integration into the open science ecosystem.

The IPGP-DC manages and disseminates data from seven observation networks, covering a wide range of disciplinary fields such as seismology, geodesy, and volcanology. These data are produced and transmitted to the Data Center by the following infrastructures and observatories:

- **GEOSCOPE Observatory**: global network of broadband seismological stations;
- **Guadeloupe Volcanological and Seismological Observatory**: network of seismological, accelerometric, volcanological, and GNSS stations;
- **Martinique Volcanological and Seismological Observatory**: network of seismological, accelerometric, volcanological, and GNSS stations;
- **Piton de la Fournaise Volcanological Observatory**: network of seismological, volcanological, and GNSS stations;



- **Le Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA)** : réseau de stations sismologiques et GNSS ;
- **l'Observatoire InSight (2018–2022)** : données sismologiques acquises par la station martienne de la mission InSight.
- **Mayotte Volcanological and Seismological Monitoring Network (REVOSIMA)**: network of seismological and GNSS stations;
- **InSight Observatory (2018–2022)**: seismological data acquired by the Martian station of the InSight mission.

Depuis 2022, le CD-IPGP a également déployé un entrepôt institutionnel de données, IPGP Research Collection (<https://research-collection.ipgp.fr>), dédié à la préservation, à la diffusion et à la valorisation des données issues des activités d'observation et de recherche de l'IPGP. Cet entrepôt facilite l'identification, l'accès et la citation des jeux de données, tout en garantissant leur conformité aux principes FAIR (Faciles à trouver, Accessibles, Interopérables et Réutilisables).

La mise en place de ce service a conduit à un élargissement des missions du CD-IPGP, qui assure désormais l'hébergement et la mise à disposition des données associées à des projets scientifiques et à des publications dans des revues à comité de lecture, contribuant ainsi au développement de la science ouverte à l'IPGP.

L'équipe du CD-IPGP est constituée, en 2025, de quatre personnes, comprenant un chercheur et trois ingénieurs, représentant un total de 3,25 équivalents temps plein (ETP). Le fonctionnement du Centre de données bénéficie par ailleurs d'un appui administratif assuré par deux gestionnaires. Le CD-IPGP collabore étroitement avec les observatoires de l'IPGP, ainsi qu'avec le Service de Calcul Parallèle et de Traitement de Données en Sciences de la Terre, S-CAPAD et le service informatique de l'Institut, afin d'assurer la cohérence et la pérennité des services de gestion et de diffusion des données.

Enfin, les membres du CD-IPGP sont activement impliqués dans les réseaux d'ingénieurs des infrastructures nationales Epos-France et FormaTerre, contribuant ainsi aux échanges de bonnes pratiques et au développement coordonné des services de données.

Since 2022, the IPGP-DC has also deployed an institutional data repository, IPGP Research Collection (<https://research-collection.ipgp.fr>), dedicated to the preservation, dissemination, and valorization of data resulting from IPGP observation and research activities. This repository facilitates the identification, access, and citation of datasets, while ensuring compliance with the FAIR principles (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable).

The implementation of this service has led to an expansion of the IPGP-DC's missions, which now also hosts and disseminates data associated with scientific projects and publications in peer-reviewed journals, thereby contributing to the development of open science at IPGP.

In 2025, the IPGP-DC team consisted of four people, including one researcher and three engineers, representing a total of 3.25 full-time equivalent (FTE) positions. The operation of the Data Center also benefits from administrative support provided by two administrative officers.

The IPGP-DC works closely with IPGP observatories, as well as with the Parallel Computing and Earth Sciences Data Processing Service (S-CAPAD) and the Institute's IT department, to ensure the coherence and sustainability of data management and dissemination services.

Finally, members of the IPGP-DC are actively involved in the engineering networks of the national infrastructures Epos France and FormaTerre, contributing to the exchange of best practices and to the coordinated development of data services.

Activités en 2025

Activities in 2025

Amélioration de la qualité des services et de la disponibilité des données

Les actions menées en 2025 constituent une étape clé en vue de la préparation d'un chantier de certification des entrepôts du Centre de données (« entrepôt de données de confiance »), qui débutera en 2026. Bien que principalement techniques et peu visibles pour les utilisateurs, elles sont déterminantes pour l'amélioration continue de la qualité, de la robustesse et de la disponibilité des services.

Improving service quality and data availability

The actions carried out in 2025 represent a key step in preparation for a repository certification process ("trusted data repository"), which will begin in 2026. Although mainly technical and not very visible to users, these actions are crucial for the continuous improvement of service quality, robustness, and availability.



En 2025, l'intégration automatique de données GNSS dans le nœud EPOS-GNSS a été mise en production en coordination avec les observatoires volcanologiques et sismologiques.

Une nouvelle solution de supervision du système d'information et des services a été déployée. Elle est pleinement opérationnelle et plus évolutive.

La migration des services du CD-IPGP vers le Service Mutualisé de Virtualisation (SMV) de l'IPGP est en cours. Cette migration, très largement avancée à la fin de l'année, modernise l'environnement d'hébergement et renforce la résilience des services, même si certaines étapes restent à finaliser.

Un effort important a été consacré à la documentation des services et des procédures opérationnelles. Ces initiatives renforcent la fiabilité du fonctionnement quotidien et la qualité des services et facilitent la reprise rapide des opérations en cas d'incident.

IPGP Research Collection

L'entrepôt institutionnel IPGP Research Collection poursuit sa croissance régulière. En 2025, 22 nouveaux jeux de données ont été déposés dans l'entrepôt, en ligne avec les 24 jeux de données déposés en 2024. Au 31 décembre 2025, la collection comprend ainsi 67 jeux de données, témoignant de son rôle croissant dans la préservation, la diffusion et la valorisation des résultats des activités de recherche et d'observation de l'IPGP.

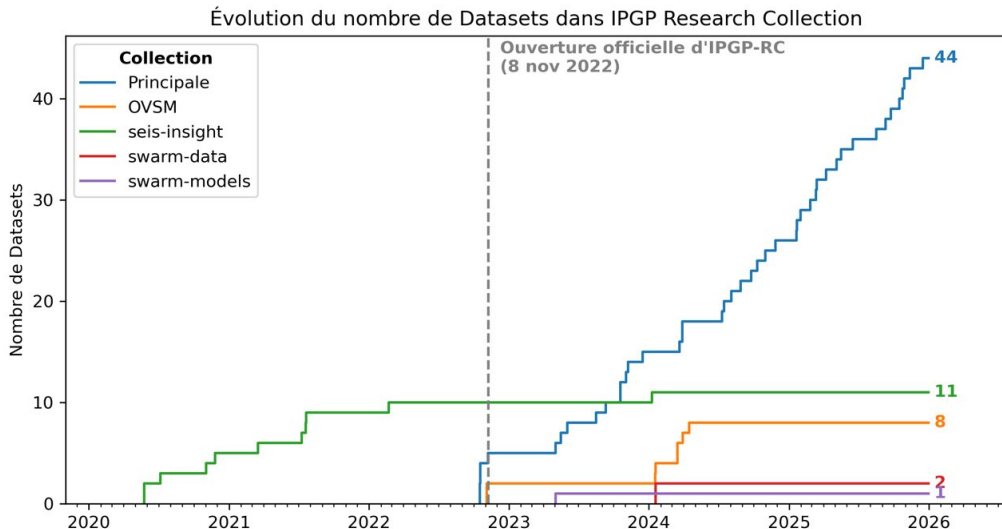
In 2025, the automatic integration of GNSS data into the EPOS GNSS node was put into production in coordination with the volcanological and seismological observatories. A new solution for monitoring the information system and services was deployed. It is fully operational and more scalable.

The migration of CD IPGP services to the Shared Virtualization Service (SMV) of IPGP is underway. This migration, largely completed by the end of the year, modernizes the hosting environment and strengthens service resilience, even though some steps remain to be finalized.

A significant effort was devoted to documenting services and operational procedures. These initiatives enhance the reliability of daily operations and service quality, and facilitate rapid recovery in the event of an incident.

IPGP Research Collection

The institutional repository IPGP Research Collection continued its steady growth. In 2025, 22 new datasets were deposited in the repository, in line with the 24 datasets deposited in 2024. As of December 31, 2025, the collection includes 67 datasets, demonstrating its growing role in preserving, disseminating, and valorizing the results of IPGP research and observation activities.



Évolution du nombre de Datasets dans IPGP Research Collection. La Collection de données de Seis-InSight, créée en 2020, a été intégrée par la suite dans l'entrepôt.

Evolution of the number of datasets in the IPGP Research Collection. The Seis-InSight data collection, created in 2020, was later integrated into the repository.



Science ouverte et FAIRDATAACITÉ

Le CD-IPGP participe aux groupes de coordination et de pilotage du projet FAIRDATAACITÉ (Université Paris Cité, IPGP, Institut Pasteur - <https://u-paris.fr/science-ouverte/fairdatacite>), lancé en septembre 2024. Ce projet vise la labellisation “Atelier de la donnée” par la plateforme nationale Research Data Gouv, et s’inscrit dans le cadre du développement du réseau de science ouverte de l’université et des instituts partenaires.

FAIRDATAACITÉ a pour principaux objectifs d’accompagner le personnel scientifique dans la gestion des données de recherche, de sensibiliser aux enjeux juridiques et éthiques, et de promouvoir l’application concrète des principes FAIR (Faciles à trouver, Accessibles, Interopérables et Réutilisables).

En 2025, un guichet unique, mis en place par l’ensemble des partenaires, a été ouvert pour répondre aux questions des chercheurs et chercheuses sur la gestion des données. Ce service fournit un accompagnement personnalisé, facilitant ainsi l’adoption des bonnes pratiques et l’intégration des principes FAIR dans les projets de recherche.

Epos-France

Lancée fin 2023, l’infrastructure nationale de recherche Epos-France (<https://www.epos-france.fr>) succède à Résif et constitue la participation française à la plateforme européenne EPOS (<https://www.epos-eu.org>).

Le CD-IPGP, impliqué dans Résif depuis ses débuts, contribue activement à la construction et au développement d’Epos-France, en particulier au sein des Actions Transverses Thématiques : Système d’information sismologique et Système d’information GNSS.

Grâce à cette implication, les données d’observation gérées par le CD-IPGP – sismologiques, volcanologiques et GNSS – sont intégrées aux systèmes d’information d’Epos-France et deviennent ainsi accessibles via la plateforme européenne EPOS, renforçant leur visibilité et leur réutilisation par la communauté scientifique.

Data Terra et le projet Gaia Data

L’infrastructure de recherche Data Terra (<https://www.data-terra.org>) développe une plateforme numérique distribuée pour l’observation, la compréhension et la modélisation du système Terre. Elle fournit aux communautés scientifiques et aux acteurs socio-économiques des produits et services de données multi-sources (satellites, in situ, modélisation), standardisés et interopérables selon les principes FAIR, facilitant ainsi la découverte, l’accès, l’analyse et la visualisation des données.

Open Science and FAIRDATAACITÉ

The IPGP-DC participates in the coordination and steering groups of the FAIRDATAACITÉ project (Université Paris Cité, IPGP, Institut Pasteur - <https://u-paris.fr/science-ouverte/fairdatacite>), launched in September 2024. This project aims to obtain the “Atelier de la donnée” label from the national Research Data Gouv platform and is part of the development of the open science network of the university and partner institutes.

FAIRDATAACITÉ primarily aims to support scientific staff in research data management, raise awareness of legal and ethical issues, and promote the practical application of the FAIR principles (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable).

In 2025, a one-stop service, established by all partners, was launched to respond to researchers’ questions on data management. This service provides personalized support, facilitating the adoption of good practices and the integration of FAIR principles into research projects.

Epos France

Launched at the end of 2023, the national research infrastructure Epos France (<https://www.epos-france.fr>) succeeds Résif and constitutes the French contribution to the European EPOS platform (<https://www.epos-eu.org>).

The IPGP-DC, involved in Résif since its inception, actively contributes to the construction and development of Epos France, particularly within the Thematic Transversal Actions: Seismological Information System and GNSS Information System.

Through this involvement, observation data managed by the IPGP-DC—seismological, volcanological, and GNSS—are integrated into the Epos France information systems and thus become accessible via the European EPOS platform, enhancing their visibility and reuse by the scientific community.

Data Terra and the Gaia Data project

The Data Terra research infrastructure (<https://www.data-terra.org>) develops a distributed digital platform for observing, understanding, and modeling the Earth system. It provides scientific communities and socio economic stakeholders with multi source data products and services (satellite, in situ, modeling) standardized and interoperable according to FAIR principles, facilitating data discovery, access, analysis, and visualization.



Le projet Gaia Data (<https://www.gaia-data.org>) contribue directement à la construction de cette infrastructure en développant une architecture nationale distribuée pour le stockage, le traitement et la gestion de données FAIR multi-domaines. S'appuyant sur un réseau de huit centres de données et de services (CDS), Gaia Data a pour ambition de mettre en place des services répartis de découverte, d'accès, d'analyse et de visualisation, répondant aux besoins scientifiques et aux enjeux sociétaux, en particulier sur les changements climatiques et environnementaux.

L'IPGP est l'un des huit CDS de Gaia Data. Le CD-IPGP met à disposition les services d'accès aux données et produits, apporte son expertise en gestion des données et collabore étroitement avec les équipes du pôle FormaTerre (Terre solide) de Data Terra et du projet Gaia Data, basées à l'IPGP, renforçant ainsi l'intégration des données géophysiques dans l'infrastructure nationale.

Mission Farside Seismic Suite (FSS)

La mission Farside Seismic Suite, sous la responsabilité de Jet Propulsion Laboratory, déploiera, en 2027, une station sismique autonome dans le cratère d'impact Schrödinger de la Lune.

Suite à l'expertise acquise dans la gestion et distribution des données sismologiques de la Mission InSight sur Mars, le Centre de données IPGP fait partie de FSS en tant que segment de sol, chargé de collecter, valider et fournir l'accès aux données sismologiques à l'équipe scientifique FSS et à l'observatoire SNO FSS en particulier.

En 2025, le CD-IPGP a implémenté une plateforme de tests et déployé la première version du logiciel de gestion et distribution de données. Le portail privé d'accès aux données de la mission sera développé en 2026. Les catalogues sismiques produits par le Lunar Quake System (LQS), développé par IPGP, seront disponibles sur l'entrepôt de données IPGP Research Collection.

Le CD-IPGP a également la responsabilité de transmettre les données de la mission vers les centres de données EarthScope et PDS de la NASA.

The Gaia Data project (<https://www.gaia-data.org>) directly contributes to the construction of this infrastructure by developing a national distributed architecture for the storage, processing, and management of FAIR multi domain data. Based on a network of eight data and service centers (CDS), Gaia Data aims to establish distributed services for discovery, access, analysis, and visualization, addressing scientific needs and societal challenges, particularly those related to climate and environmental change.

IPGP is one of the eight Gaia Data CDS. The IPGP-DC provides data and product access services, contributes its expertise in data management, and works closely with the FormaTerre (solid Earth) teams of Data Terra and the Gaia Data project based at IPGP, thereby strengthening the integration of geophysical data into the national infrastructure.

Farside Seismic Suite (FSS) mission

The Farside Seismic Suite mission, under the responsibility of the Jet Propulsion Laboratory, will deploy an autonomous seismic station in 2027 in the Schrödinger impact crater on the Moon.

Building on the expertise acquired in managing and distributing seismological data from the InSight mission on Mars, the IPGP Data Center is part of FSS as a ground segment, responsible for collecting, validating, and providing access to seismological data to the FSS science team and, in particular, to the FSS SNO observatory.

In 2025, the IPGP-DC implemented a test platform and deployed the first version of the data management and distribution software. The private data access portal for the mission will be developed in 2026. Seismic catalogs produced by the Lunar Quake System (LQS), developed by IPGP, will be available in the IPGP Research Collection data repository.

The IPGP-DC is also responsible for transmitting mission data to the EarthScope and NASA PDS data centers.

En savoir plus / Read more :

IPGP Research Collection : <https://research-collection.ipgp.fr>

Le CD-IPGP en chiffres : The IPGP-DC in Numbers:



43 ans de données d'observation accessibles *via* des interfaces standards

43 years of observational data accessible through standard interfaces



5 réseaux GNSS
5 GNSS networks



91 stations GNSS
91 GNSS stations



7 réseaux de données sismologiques, accélérométriques et volcanologiques couvrant **202 stations**

7 seismic, accelerometric, and volcanological data networks covering **202 stations**



78 jeux de données déposés dans l'entrepôt "IPGP Research Collection"

78 datasets deposited in the IPGP Research Collection repository



190 stations diffusant les données en temps réel

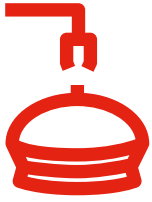
190 stations distributing data in real-time



23 teraoctets de données et produits stockés et diffusés
23 terabytes of stored and distributed data and products

Un travail quotidien

- ✓ Collaboration étroite avec les **observatoires** ;
Close collaboration with the observatories
- ✓ **Validation et intégration** des données ;
Data validation and integration
- ✓ **Développement et maintenance** des applications ;
Development and maintenance of applications
- ✓ Garantie de la **qualité des services** ;
Ensuring service quality
- ✓ **Exploitation** du système d'information ;
Operation of the information system
- ✓ **Support aux utilisateurs** (observatoires, chercheurs, doctorants, ingénieurs...);
User support (observatories, researchers, PhD students, engineers...)



Service national d'observation FarSide Seismic Suite FarSide Seismic Suite national observation service

Dans le cadre des restructurations des SNO par l'INSU, le Service National d'Observation FSS, créé le 1^{er} janvier 2024, évolue vers un Service National d'Observation en Sismologie Planétaire qui à terme pourra donc intégrer tous les projets français spatiaux dans cette thématique.

2025 pourrait en effet être l'année de la sélection d'une seconde station sismologique lunaire avec un sismomètre VBBZ : la NASA a en effet annoncé la sélection de l'expérience South Pole Seismic Suite dans la charge utile de la seconde mission Artémis atterrissant sur la Lune.

Avec le sismomètre de la mission Chang'E 7, dont le lancement est prévu durant le second semestre 2026, le sismomètre de la première mission Artémis LEMS avec un lancement vers 2028 puis FSS et SPSS en 2029-2030 et enfin Chang'E 8 un peu plus tard, c'est donc un réseau sismologique Lunaire de 5 stations qui pourrait être déployé dans l'hémisphère sud de la Lune à l'horizon 2030.

Dès sa confirmation par le CNES, espérée au printemps 2026, l'équipe du SNO s'attèlera donc à la réalisation et aux tests des deux modèles de SPSS, un modèle de vol et un de recharge. En parallèle, l'équipe du Lunar Quake Service (LQS) continue le développement du segment sol de FSS, afin d'être prêt pour le redémarrage des activités environ 6 mois avant le lancement de la première station, et donc mi-2028.

Enfin, et dans le cadre du projet ERC LISTEN-FLASH, le groupe de sismologie planétaire développe en collaboration avec l'Observatoire de Côte d'Azur un réseau global de télescopes infra-rouge dont la mission sera de compléter les observations sismiques par la détection de flash lumineux associés aux impacts. Avec à la clef la caractérisation de la croûte et du manteau supérieur de la Lune et l'impératif pour ces différents projets sur Terre et sur la Lune d'être au rendez-vous d'une nouvelle découverte de la structure interne de notre satellite, près de 60 ans après Apollo 11.

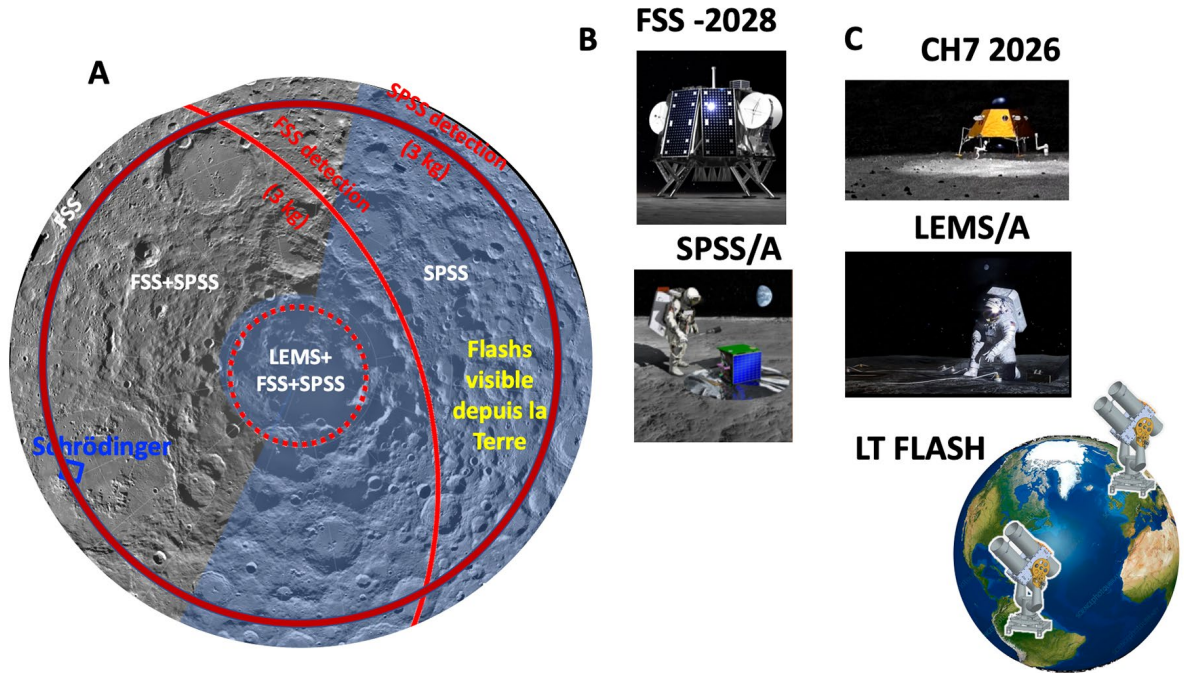
As part of the restructuring of National Observation Services (SNOs) led by INSU, the FarSide Seismic Suite (FSS), established on 1st January 2024, is evolving into a National Observation Service in planetary seismology. In the longer term, this structure is intended to encompass all French space missions related to this field.

The year 2025 may mark a major milestone with the potential selection of a second lunar seismic station equipped with a VBBZ seismometer. NASA has indeed announced the selection of the South Pole Seismic Suite (SPSS) experiment as part of the payload of the second Artemis program mission to land on the Moon.

Together with the seismometer of the Chang'e 7 mission, scheduled for launch in the second half of 2026, the seismometer of the first Artemis mission (LEMS), for an expected launch in 2028, FSS, SPSS in 2029-2030 and Chang'E 8 at a later stage, a lunar seismic network of up to five stations could be deployed across the southern hemisphere of the Moon by around 2030.

Subject to confirmation by CNES, expected in spring 2026, the SNO team will initiate the development and testing of two SPSS models: a flight model and a backup unit. In parallel, the Lunar Quake Service (LQS) team is continuing the development of the FSS ground segment to ensure operational readiness approximately six months prior to first station launch, i.e., by mid-2028.

Finally, within the framework of the LISTEN-FLASH ERC project, the planetary seismology group is developing, in collaboration with the Observatoire de la Côte d'Azur, a global network of infrared telescopes designed to complement seismic observations through the detection of optical flashes associated with impact events. This combined approach aims to improve constraints on the structure of the lunar crust and upper mantle. These initiatives—both on Earth and on the Moon—are part of a broader effort to advance our understanding of the internal structure of Earth's natural satellite, nearly 60 years after Apollo 11 Moon Landing.

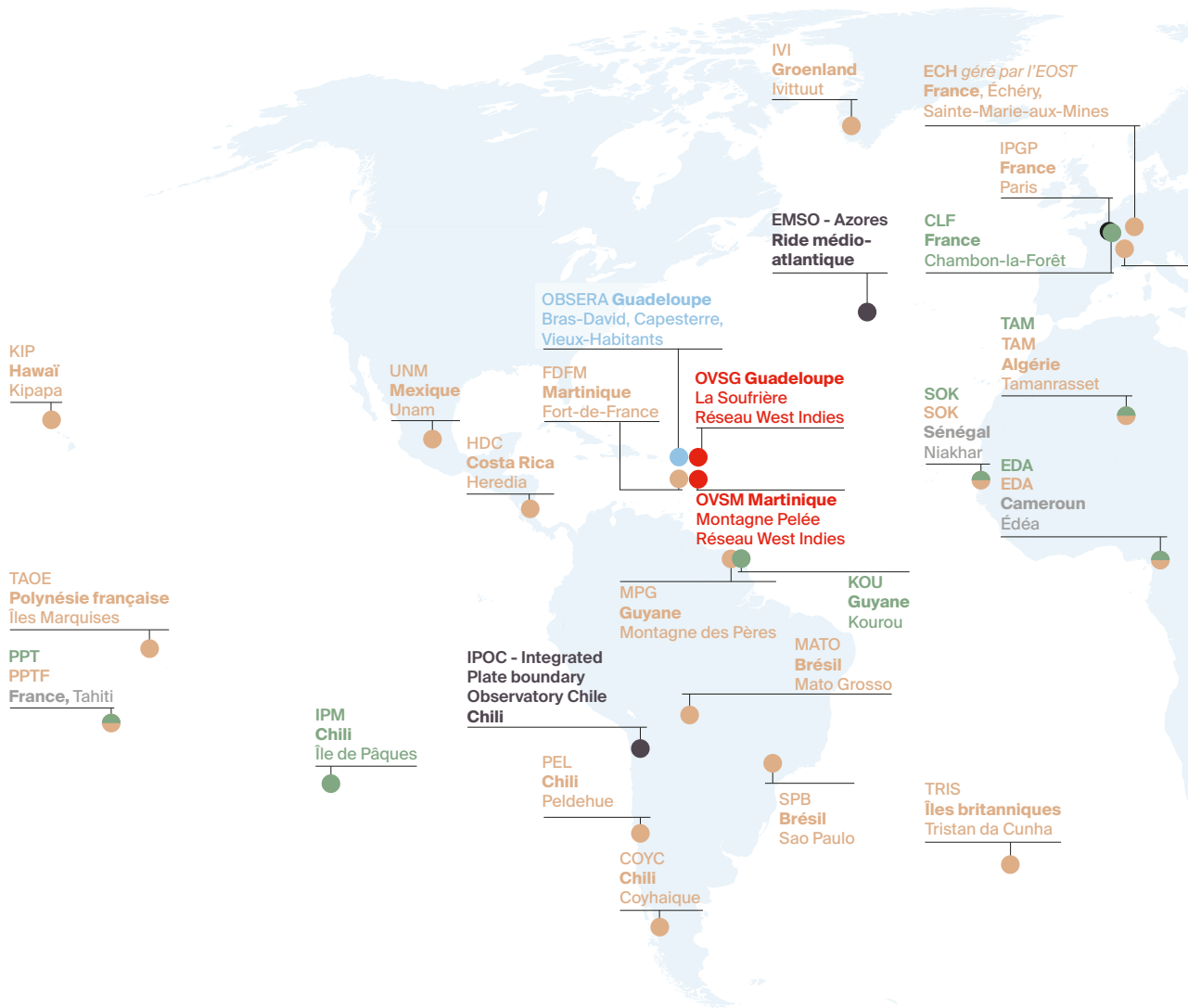


A : seuil de détection comparé des stations sismiques CH7, FSS, LEMS et SPSS ainsi que leurs sites d'atterrissage nominaux B : illustration d'artiste des deux stations sismiques sélectionnées par la NASA avec un capteur VBBZ, FSS, sur une mission robotique et SPSS, sur la seconde mission d'atterrissage lunaire du programme Artemis. Illustration d'artiste des deux autres stations sismiques chinoise et américaine, Chang'E 7 et LEMS et D, du réseau de télescopes de surveillance de flashes lunaire LISTEN FLASH

A – Comparative detection thresholds of seismic stations CH7, FSS, LEMS, and SPSS, along with their nominal landing sites. B – Artist's rendering of the two seismic stations selected by NASA featuring a VBBZ sensor: FSS (robotic mission) and SPSS (second Artemis lunar landing mission). C – Artist's rendering of the two additional Chinese and American seismic stations, Chang'e 7 and LEMS. D – Illustration of the LISTEN-FLASH lunar impact monitoring telescope network.



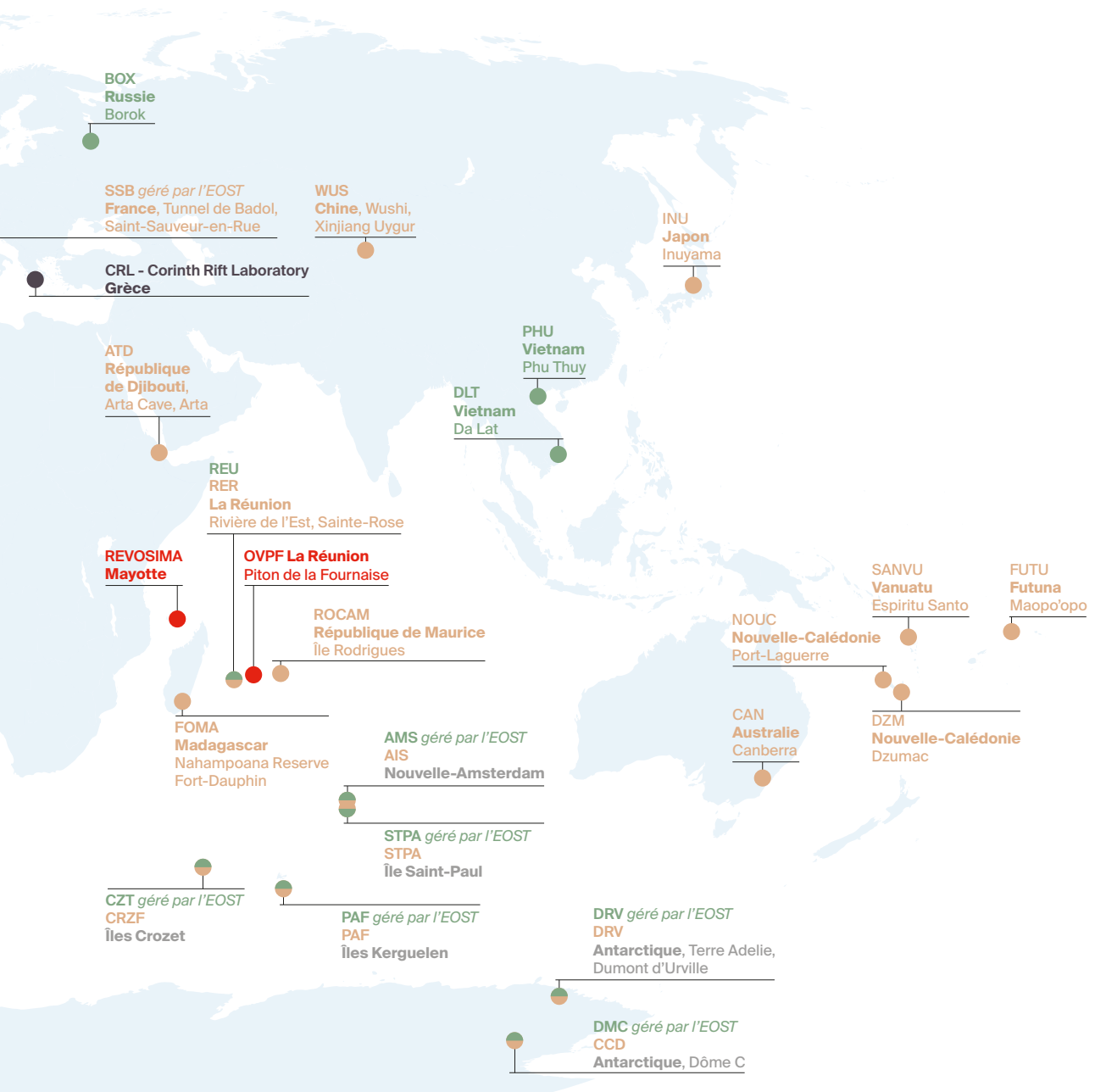
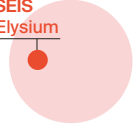
Réseau des observatoires et stations de l'IPGP Network of the IPGP observatories and stations



- **Observatoires volcanologiques et sismologiques** Volcanological and seismological observatories
 - **Observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles OBSERA** Observatory of water and erosion in the Antilles OBSERA
 - **Observatoires magnétiques du BCMT** BCMT Magnetic observatories
 - **Stations sismologiques GEOSCOPE** GEOSCOPE seismological stations
 - **Sites instrumentés** Instrumented sites
 - **Service national d'observation InSight** InSight National Observation Service
- Avec With: L'école et observatoire des sciences de la Terre EOST



INSIGHT - Sismomètre SEIS
Planète Mars, Plaine d'Elysium





S-CAPAD/DANTE : déjà 4 ans au service de la science S-CAPAD/DANTE: 4 years of serving science

La plateforme numérique de calcul intensif et d'analyse de données massives S-CAPAD/DANTE, inaugurée le 7 octobre 2021 par la Région Île-de-France, l'IPGP, le CNRS, Université Paris Cité et la société Lenovo (voir le rapport annuel IPGP de 2022), a passé le cap de la moitié de sa durée prévue d'exploitation (2021-2028). Profitons-en pour revenir sur l'histoire du calcul intensif à l'IPGP, rappeler quelles ressources sont mises à disposition des étudiants, chercheurs et ingénieurs, dresser un premier bilan d'exploitation et esquisser le futur de la plateforme et du calcul intensif à l'IPGP

Une brève histoire du calcul à l'IPGP

La culture du calcul s'est développée à l'IPGP au fil des années, posant les bases de l'infrastructure actuelle. Dès 1989, sous l'impulsion de Claude Allègre, la direction de la recherche et des études doctorales du ministère de l'Éducation nationale s'oriente vers le calcul intensif ou haute performance (HPC comme High Performance Computing) pour les universitaires et chercheurs.

Un premier centre est créé à l'IPGP, sur le campus de Jussieu. Il repose sur une machine massivement parallèle expérimentale, la CM2 (Connection Machine construite par Thinking Machines Corporation), dédiée d'abord aux sciences de la Terre. Le centre s'ouvre ensuite à d'autres disciplines : astronomie, sciences de la matière, sciences de l'ingénieur et mathématiques. En 1993, il se dote d'une nouvelle machine massivement parallèle, la CM5-128. À cette occasion, le CNCPST (Centre National de Calcul Parallèle en Sciences de la Terre) obtient, dans le cadre d'un plan quadriennal, le statut de centre national, au même titre que l'IDRIS et le CNUSC (devenu CINES en 1999).

Dès ses débuts, ce centre ne se limite pas à fournir du temps de calcul, mais joue également un rôle important dans la formation, l'animation et la diffusion scientifique, comme l'illustre la préface au rapport scientifique du CNCPST pour 1996-1997 écrite par le président de son conseil scientifique, Vincent Courtillot (voir la Figure 1).

The S-CAPAD/DANTE digital platform for high-performance computing and large-scale data analysis was inaugurated on October 7, 2021, by Région Île-de-France, IPGP, CNRS, Université Paris Cité, and Lenovo (see the 2022 IPGP annual report). It has passed the midpoint of its planned lifespan (2021–2028). This provides an opportunity to review the history of high-performance computing at IPGP, to recall what resources are available to students, researchers, and engineers, to present an initial operational assessment, and to outline the future of the platform and of high-performance computing at IPGP.

A brief history of computing at IPGP

The culture of computing has developed at IPGP over the years, laying the foundations for the current infrastructure. As early as 1989, at the initiative of Claude Allègre, the Directorate for Research and Doctoral Studies of the French Ministry of National Education began directing academics and researchers toward high-performance computing (HPC).

A first computing centre was established at IPGP on the Jussieu campus. It was built around an experimental massively parallel machine, the CM2 (Connection Machine, manufactured by Thinking Machines Corporation), initially dedicated to Earth sciences. The centre later opened up to other disciplines: astronomy, physics and chemistry, engineering, and mathematics. In 1993, it acquired a new massively parallel machine, the CM5-128. On that occasion, the CNCPST (National Centre for Parallel Computing in the Earth Sciences) obtained, under a four-year plan, the status of a national centre, on a par with IDRIS and CNUSC (which became CINES in 1999).

From its early days, the centre was not limited to providing computing time; it also played an important role in training, scientific outreach and community building, as illustrated by the preface to the 1996–1997 CNCPST scientific report written by the chair of its scientific council, Vincent Courtillot (see Figure 1).



Au fil des années, les moyens de calcul et l'organisation du centre ont évolué pour répondre aux nouveaux besoins et aux avancées technologiques proposées par les constructeurs (TMC, DEC, Compaq, IBM, DELL, Lenovo ...) et, en 2010, il est devenu le Service de Calcul Parallèle et de Traitement de Données en sciences de la Terre (S-CAPAD), situé dans l'îlot Cuvier de l'IPGP. Il héberge, depuis 2021, la plateforme numérique DANTE.

S-CAPAD/DANTE aujourd'hui

Le supercalculateur, présenté sur la Figure 2, repose sur une architecture conçue pour répondre aux besoins variés des géosciences. Au-delà des capacités de calcul pur, la plateforme intègre une dimension HPDA (High Performance Data Analytics) : elle permet de traiter efficacement de gros volumes de données, qu'il s'agisse de données d'observation ou de données produites par les simulations elles-mêmes. Une baie de stockage froid et pérenne d'environ 1 Po complète donc l'infrastructure de calcul ; cette baie héberge notamment une sauvegarde des données du Centre de Données de l'institut. La convergence entre calcul intensif et analyse de données massives est au cœur des usages actuels et à venir.

Le financement initial de la plateforme provient pour partie (35 %) du dispositif SESAME de la Région Île-de-France, projet co-soumis avec le laboratoire APC (Astroparticule et cosmologie) et pour le reste des fonds propres de l'IPGP.

La pérennisation de l'infrastructure s'appuie sur un modèle économique construit avec le service financier de l'IPGP, incluant la mise en place d'une tarification des unités d'œuvre (heure CPU, heure GPU, stockage) visant à couvrir les coûts d'extension de garanties et de maintenance. La plateforme S-CAPAD/DANTE est une plateforme labellisée d'Université Paris Cité et un mésocentre référencé par le groupe Calcul du CNRS. Elle s'inscrit dans l'écosystème européen du calcul intensif, selon la pyramide montrée Figure 3. Elle est complémentaire des centres nationaux GENCI (IDRIS, TGCC, CINES) et des infrastructures européennes EuroHPC. Cette articulation permet aux chercheurs de l'IPGP de bénéficier d'une chaîne cohérente allant du calcul exploratoire à la production à très grande échelle.

Over the years, the centre's computing resources and organisational structure evolved to meet new demands and to keep pace with technological advances proposed by manufacturers (TMC, DEC, Compaq, IBM, DELL, Lenovo, etc.). In 2010, it became the Service de Calcul Parallèle et de Traitement de Données en sciences de la Terre (S-CAPAD), located on the îlot Cuvier of the IPGP campus. Since 2021, it has hosted the DANTE digital platform.

S-CAPAD/DANTE today

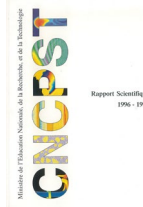
The supercomputer, shown in Figure 2, is built on an architecture designed to meet the varied needs of the geosciences. Beyond pure computing capabilities, the platform incorporates an HPDA (High Performance Data Analytics) dimension: it enables efficient processing of large volumes of data, whether observational data (seismic, magnetic, satellite) or data produced by the simulations themselves. A cold and permanent storage array of approximately 1 PB therefore complements the computing infrastructure; this array notably hosts a backup of data from the institute's Data Centre. The convergence of high-performance computing and large-scale data analytics is at the heart of current and future usage.

The initial funding for the platform came partly (35 %) from the SESAME programme of Région Île-de-France, a project co-submitted with the APC laboratory (Astroparticle and Cosmology), with the remainder coming from IPGP's internal funds.

The long-term sustainability of the infrastructure is based on a financial model developed with IPGP's finance department, including the introduction of a pricing scheme for computing units (CPU hour, GPU hour, storage) designed to cover the costs of warranty extensions and maintenance. The S-CAPAD/DANTE platform is a certified platform of Université Paris Cité and a mesocentre referenced by the CNRS Computing Group. It is part of the European high-performance computing ecosystem, according to the pyramid shown in Figure 3. It complements the national GENCI centres (IDRIS, TGCC, CINES) and the EuroHPC European infrastructures. This coordination allows IPGP researchers to benefit from a coherent chain ranging from exploratory computing to very large-scale production.



Préface



Ce rapport annuel du Centre National de Calcul Parallèle en Sciences de la Terre est le dernier. Après quatre années de fonctionnement, le CNCPT a été clos, à la demande de la DGRT, le 30 juin 1997.

Créé en 1992, sous l'impulsion de Claude Allègre et de la direction de la recherche et des études doctorales du Ministère de l'éducation nationale, le CNCPT, au sein de l'Institut de Physique du Globe de Paris, fut le premier centre national de calcul parallèle mettant à la disposition de la communauté des chercheurs et universitaires français, l'une des machines parallèles les plus puissantes d'Europe.

L'évolution du calcul scientifique et de la technologie informatique a montré la pertinence de ce choix. Le CNCPT a ainsi contribué à l'émergence, autour des grands problèmes des sciences de la Terre, d'une communauté scientifique active et internationalement reconnue dans le domaine de la modélisation physique et du calcul massivement parallèle.

Afin d'éviter une coupure dans l'activité des différents projets scientifiques, le CNCPT obtint l'autorisation de prolonger son fonctionnement six mois en 1997 pour permettre la finalisation de certains projets, en particulier ceux effectués dans le cadre de thèses, et la migration des applications vers d'autres architectures, en liaison avec les équipes techniques des deux autres centres nationaux (IDRIS et CNUSC).

La part la plus importante des ressources a été consacrée à la recherche (environ 25000 heures consommées en 1996, soit 90% de l'utilisation) et est en progression sensible par rapport à celle de 1995. Le domaine des sciences de la Terre en constitue le secteur le plus important avec 11000 heures. En 1997, l'activité du secteur recherche a été particulièrement soutenue (plus de 13000 heures), supérieure à celle de 1996 sur la même période, et atteste du bien fondé de la décision de prolongation.

Après appel d'offre et évaluation commune aux trois centres nationaux (CNCPT, CNUSC, IDRIS), le comité scientifique a retenu, en 1996, 45 projets qui vont de la convection 3D dans les manteaux planétaires à l'écoulement des fluides miscibles dans les milieux poreux, de la magnétohydrodynamique aux instabilités des fluides stratifiés, de la physique des milieux granulaires à la propagation d'ondes sismiques, de la fusion orientationnelle aux réseaux neuronaux... En 1997, aucun nouveau projet n'a été retenu, et tous les projets en cours ont été évalués par les comités nationaux. L'essentiel de ce rapport illustre la variété et l'abondance des résultats obtenus pendant cette période.

Au delà du vieillissement rapide des infrastructures informatiques, un centre comme le CNCPT doit continuellement s'adapter aux nouvelles demandes de la communauté scientifique. Prolongation naturelle de l'approche expérimentale aux échelles extraordinaires d'espace et de temps qui font la spécificité du système Terre, la physique numérique est devenue, ces dernières années, un outil fondamental de la recherche en sciences de la Terre. Afin de répondre à ces besoins, le CNCPT, en liaison avec les utilisateurs, et avec l'aide du MENRT, du CNRS et de l'IPGP, a choisi de se remettre en cause. Un département horizontal de modélisation physique et numérique a ainsi été créé au sein de l'IPGP, permettant d'associer plus étroitement ressources de pointe en matière de calcul intensif et laboratoires possédant une culture d'observation et d'expérimentation. Ce nouveau département a pour vocation d'animer un pôle francilien multidisciplinaire autour des problèmes des sciences de la Terre et de l'environnement dont la modélisation requiert des développements spécifiques, et de contribuer à la formation des étudiants dans les domaines de la modélisation des systèmes naturels.

Complémentaire de la politique nationale en matière de calcul scientifique, une telle évolution replace le calcul parallèle comme un outil scientifique entre les mains des chercheurs dont les formidables besoins sont *in fine* à l'origine des avancées technologiques en matière de calcul haute performance. Mais ceci n'est plus une aventure nationale, c'est l'aventure de l'Institut de Physique du Globe de Paris.

Je tiens pour finir à remercier tous ceux qui ont permis le succès du CNCPT, notamment ses trois directeurs scientifiques successifs, Yan Bottinga, Peter Mora, et Jean-Pierre Vilotte, ceux qui ont fait « tourner » l'informatique du CNCPT, Pierre-François Jeannin, Patrick Stoclet et Geneviève Moguilny.

Vincent COURTILLOT

Conseiller spécial du Ministère de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie

FIGURE 1 - Préface de V. Courtillot dans le rapport scientifique du CNCPT 1996-1997.

Preface by V. Courtillot in the CNCPT scientific report 1996-1997.

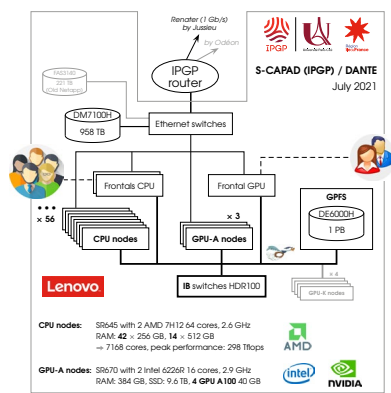
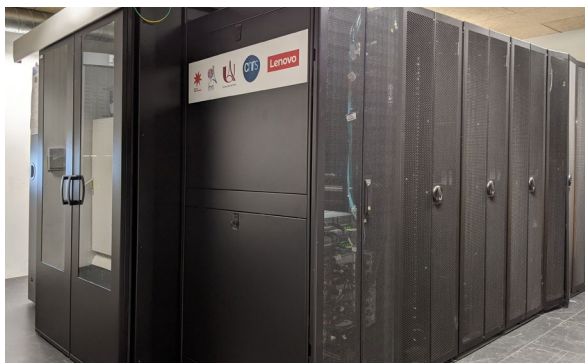


FIGURE 2 - À gauche : vue de l'intérieur de la salle 2300 du bâtiment Cuvier qui héberge le supercalculateur. À droite : configuration matérielle. Left: view inside room 2300 of the Cuvier building, which houses the supercomputer. Right: hardware configuration.



FIGURE 3 - L'écosystème européen du calcul intensif (www.genci.fr/connaître-genci/notre-ecosysteme). S-CAPAD/DANTE est un Tier2 de taille moyenne. The European high-performance computing ecosystem (www.genci.fr/en/learn-about-genci/our-ecosystem). S-CAPAD/DANTE is a mid-sized Tier2 centre.

Bilan 2021-2025

Entre sa mise en service en août 2021 et la fin de l'année 2025, le supercalculateur a enregistré un taux d'utilisation moyen de 64 %. Au total, 236 utilisateurs l'ont exploité. Ces utilisateurs sont soit membres des équipes de l'institut (13 équipes sur 17), soit collaborateurs ou chercheurs externes à l'IPGP. Ils ont cumulé 184 millions d'heures de calcul CPU. Sur les quatre années pleines allant de 2022 à 2025, les travaux menés sur la plate-forme ont donné lieu à 75 publications dans des revues internationales à comité de lecture, selon la distribution donnée sur la Figure 4. Le supercalculateur soutient l'ensemble des activités de modélisation et de traitement de données de l'IPGP : sismologie, géodynamique, magnétisme terrestre, dynamique des fluides, volcanologie, planétologie, géophysique appliquée. D'autres disciplines comme l'informatique, l'épidémiologie, l'économie ou les neurosciences utilisent également nos ressources.

Pour favoriser cette production continue de résultats et y impliquer l'ensemble des chercheurs (jeunes et moins jeunes), des sessions annuelles de formation sont organisées à destination des utilisateurs pour la prise en main du supercalculateur.

2021-2025 assessment

Between its commissioning in August 2021 and the end of 2025, the supercomputer recorded an average usage rate of 64 %. A total of 236 scientists have used the platform. These users are either members of the institute's research teams (13 out of 17 teams), or collaborators or external researchers from outside IPGP. They accumulated 184 million CPU computing hours. Over the four full years from 2022 to 2025, work carried out on the platform has resulted in 75 publications in international peer-reviewed journals, according to the distribution shown in Figure 4. The supercomputer supports all of IPGP's modelling and data processing activities: seismology, geodynamics, terrestrial magnetism, fluid dynamics, volcanology, planetology, applied geophysics. Other disciplines such as computer science, epidemiology, economics and neuroscience also use our resources.

To foster this continuous production of results and to involve all researchers (young and less young), annual training sessions are organised for users to get started with the supercomputer.

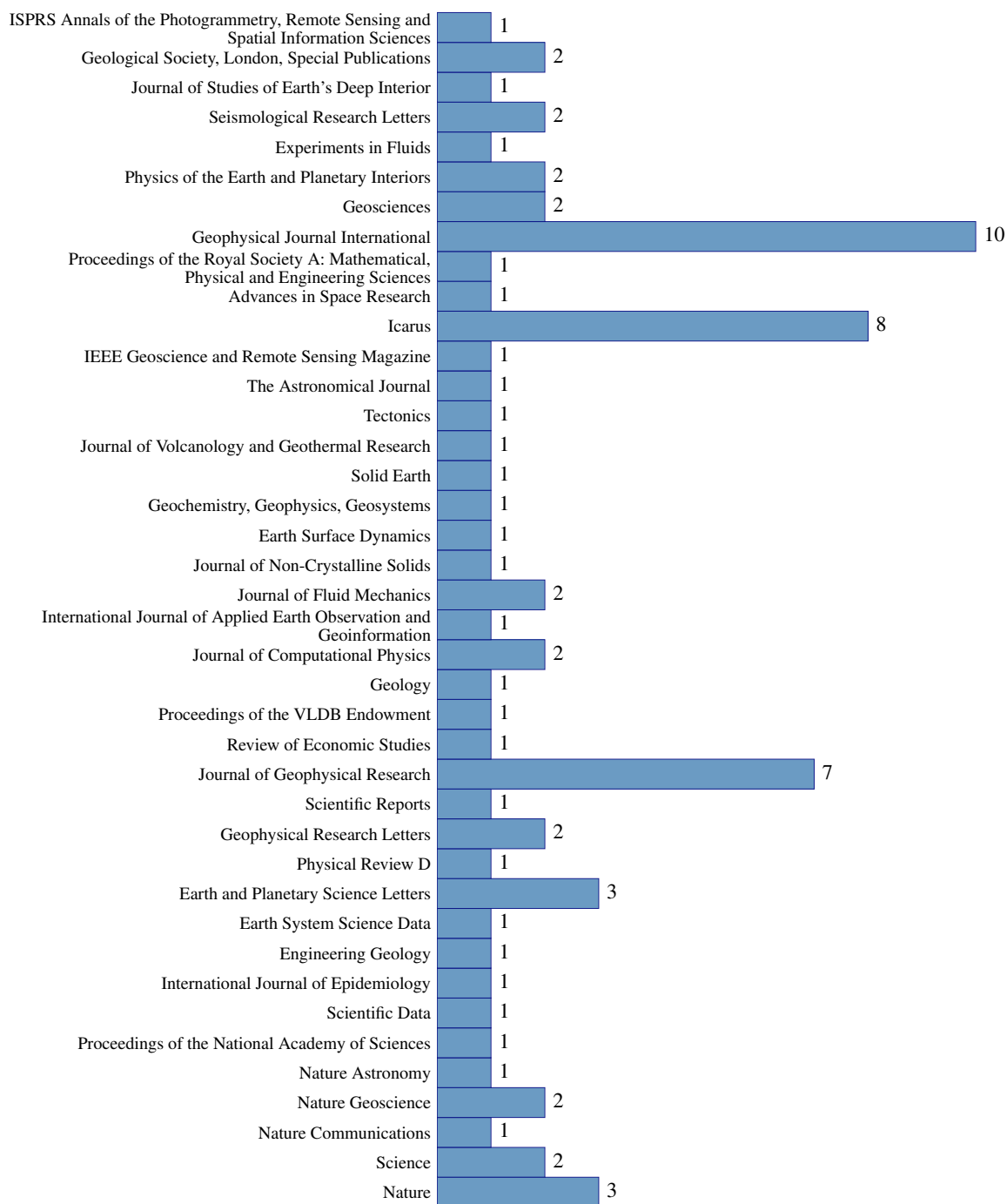


FIGURE 4 - Liste des revues dans lesquelles ont paru les 75 travaux ayant explicitement mentionné leur utilisation de la plateforme S-CAPAD/DANTE entre 2022 et 2025. Le nombre d'articles par revue varie de 1 à 10. List of journals that published the 75 works explicitly mentioning use of the S-CAPAD/DANTE platform between 2022 and 2025. The number of articles per journal ranges from 1 to 10.

Ces formations sont assurées par l'équipe technique et scientifique de la plateforme, en partenariat avec Lenovo/Neoteckno, et elles rassemblent à chaque fois une vingtaine d'apprenants (voir Figure 5).

These training sessions are provided by the platform's technical and scientific team, in partnership with Lenovo/Neoteckno, and each time bring together around twenty learners (see Figure 5).



FIGURE 5 - Formation "Introduction to the S-CAPAD/DANTE Platform" du 2 décembre 2025.

Training course "Introduction to the S-CAPAD/DANTE Platform" on December 2, 2025.

D'autres formations peuvent avoir lieu, comme celle portant sur les conteneurs Singularity en 2023. Par ailleurs, la plateforme s'est dotée en 2024 d'un serveur Jupyter-HA (High Availability) permettant le déploiement de notebooks. Cet outil facilite le traitement interactif de données, et permet de bénéficier d'un environnement standard et performant de programmation scientifique en python. Ce serveur a permis l'intégration du supercalculateur à l'offre de formation de master à la rentrée académique 2025, via les trois unités d'enseignement de M2 : Dérèglements Climatiques, Earth Data Science, et Scientific Computing for Geophysical Problems.

Perspectives

La configuration matérielle n'a pas évolué depuis l'acquisition initiale. Cependant, l'augmentation des besoins en calcul accéléré, notamment pour les applications d'apprentissage automatique et les simulations haute résolution, a conduit à envisager à court terme une extension GPU de la plateforme. Cette évolution est particulièrement attendue dans le cadre des futurs usages liés au projet Gaia Data, de développement d'une infrastructure nationale distribuée pour le stockage, le traitement et la gestion de données FAIR (Faciles à trouver, Accessibles, Interopérables et Réutilisables) multi-domaines, issues des systèmes d'observation (spatial, in-situ) et de modélisation, et dont les besoins en calcul intensif sur GPU sont stratégiques. Cette contribution s'inscrit dans une stratégie plus large de positionnement de l'IPGP sur les infrastructures de données et de calcul à l'échelle nationale.

L'exploitation de la plateforme actuelle est prévue jusqu'à l'automne 2028. La réflexion sur son futur est d'ores et déjà engagée, avec pour objectifs de maintenir la souveraineté numérique de l'institut et un niveau de service adapté aux besoins de nos activités de recherche et de formation.

Other training sessions may also be organised, such as the one on Singularity containers in 2023. Furthermore, in 2024 the platform acquired a Jupyter-HA server (High Availability) enabling the deployment of notebook environments. This tool facilitates interactive data processing and provides access to a standard, high-performance scientific programming environment in Python. This server has enabled the integration of the supercomputer into the master's level course offering as of the 2025 academic year, through three M2 classes: Dérèglements Climatiques, Earth Data Science, and Scientific Computing for Geophysical Problems.

Perspectives

The hardware configuration has not changed since the initial acquisition. However, the growing need for accelerated computing, particularly for machine learning applications and high-resolution simulations, led us to consider a near-term GPU extension of the platform. This evolution is especially anticipated in the context of future uses linked to the Gaia Data project – the development of a national distributed infrastructure for the storage, processing, and management of multi-domain FAIR data (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) originating from observation systems (space-based, in-situ) and modelling, where GPU-intensive computing needs are strategic. This contribution is part of a broader strategy positioning IPGP within national-scale data and computing infrastructures. Operation of the current platform is planned until autumn 2028. Reflection on its future has already begun, with the objectives of maintaining the institute's digital sovereignty and a level of service adapted to the needs of our research and training activities.





Enseignement Education

À l'IPGP, une conviction guide notre approche pédagogique : les sciences de la Terre sont des sciences de terrain. Former par la recherche et par l'action constitue ainsi le socle de notre enseignement, en plaçant les étudiantes et les étudiants au plus près des objets d'étude, des données et des réalités opérationnelles.

Cette exigence se traduit par des stages de terrain immersifs, conçus comme de véritables prolongements de l'activité scientifique. Le field course international organisé en 2025 en Martinique, consacré à l'étude de la Montagne Pelée en lien étroit avec l'Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique (OVSM-IPGP), en est une illustration emblématique. Les étudiants y explorent les formations volcaniques, analysent les produits éruptifs, reconstituent l'histoire du volcan et découvrent les outils de surveillance et d'anticipation des aléas.

Au-delà de cette expérience, l'IPGP propose tout au long de l'année des stages de terrain dans des contextes variés, notamment en Grèce, qui viennent compléter les enseignements théoriques. Ces dispositifs permettent de développer des compétences essentielles : observation et analyse in situ, lecture critique des données, travail collectif et restitution scientifique.

En confrontant les étudiants aux contraintes du terrain, l'Institut les prépare à exercer dans des contextes réels et complexes, à l'interface entre recherche et gestion des risques. À travers ces formations, l'IPGP affirme sa vocation : former des scientifiques rigoureux, engagés et capables d'agir face aux grands enjeux contemporains.

At IPGP, one core conviction shapes our educational approach: Earth sciences are field sciences. Training through both research and action therefore lies at the heart of our teaching, placing students as close as possible to the objects of study, the data, and real-world operational contexts.

This commitment is reflected in immersive field-based training programmes, designed as true extensions of scientific activity. The international field course held in 2025 in Martinique, dedicated to the study of Montagne Pelée in close collaboration with the Volcanological and Seismological Observatory of Martinique (OVSM-IPGP), is a key example. Students explore volcanic formations, analyse eruptive products, reconstruct the volcano's history, and discover monitoring tools used to anticipate hazards.

Beyond this flagship experience, IPGP offers field courses throughout the year in a variety of geological settings, including in Greece, complementing theoretical instruction. These programmes foster essential skills: in situ observation and analysis, critical interpretation of data, teamwork, and scientific communication.

By confronting students with real field constraints, the Institute prepares them to operate in complex, real-world environments at the interface between research and risk management. Through these programmes, IPGP reaffirms its mission: to train rigorous, committed scientists capable of addressing today's major planetary challenges.

Former sur le terrain : immersion scientifique en Martinique au cœur d'un observatoire volcanologique et sismologique et sur la Montagne Pelée

Learning in the field: scientific immersion in Martinique at the heart of a volcanological and seismological observatory on Montagne Pelée



Dans le cadre de ses formations en sciences de la Terre, L'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) poursuit son engagement en faveur d'un enseignement par la pratique, au plus près des objets d'étude. L'année 2025 a été marquée par l'organisation d'un field course international en Martinique, consacré à l'étude d'un volcan actif : la Montagne Pelée.

Encadrée par Jean-Christophe Komorowski et Guillaume Carazzo, cette formation intensive de dix jours en anglais et français, réalisée en collaboration étroite avec l'Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique (OVSM-IPGP), a permis aux étudiantes et étudiants de s'immerger dans un environnement scientifique et opérationnel.

Comprendre un volcan actif, in situ

L'objectif pédagogique est clair : appréhender le fonctionnement d'un volcan actif dans toutes ses dimensions du contexte géodynamique à la gestion des crises volcaniques.

As part of its Earth sciences training programs, the Institut de physique du globe de Paris (IPGP) continues to promote hands-on learning, as close as possible to the objects of study. The year 2025 was marked by the organization of an international field course in Martinique, dedicated to the study of an active volcano: Montagne Pelée.

Led by Jean-Christophe Komorowski and Guillaume Carazzo, this intensive ten-day program, conducted in English and French in close collaboration with the Volcanological and Seismological Observatory of Martinique (OVSM-IPGP), enabled students to immerse themselves in a scientific and operational environment of the highest level.

Understanding an active volcano, in situ

The pedagogical objective is clear: to understand the functioning of an active volcano in all its dimensions—from its geodynamic context to volcanic crisis management.



Sur le terrain, les étudiants ont exploré les produits éruptifs, analysé les structures géologiques et retracé l'histoire volcanologique de l'île, en particulier celle des éruptions majeures de la Montagne Pelée et notamment l'éruption catastrophique de 1902 qui fit près de 30 000 morts.

Les excursions quotidiennes sur le terrain ont été complétées par des sessions de travail au sein de l'observatoire, permettant de découvrir les outils de surveillance multiparamétrique (sismologie, géochimie, déformation) et de comprendre leur rôle dans l'anticipation des aléas volcaniques et l'alerte montante scientifique aux autorités responsables de la protection des populations.

Une pédagogie active et collaborative

Au cœur du dispositif : une pédagogie fondée sur l'interaction constante entre observations de terrain, analyse scientifique et travail collectif. Les étudiantes et étudiants nationaux et internationaux ont travaillé en binôme sur des articles scientifiques qu'ils ont mis en perspective avec leurs propres observations.

Cinq grandes thématiques ont structuré leur réflexion :

- Le contexte géodynamique de l'arc des Petites Antilles,
- La géologie de la Martinique,
- L'histoire éruptive de la Montagne Pelée,
- L'activité récente de la Montagne Pelée enregistrée par l'OVSM-IPGP,
- Les aléas et risques volcaniques associés.

In the field, students explored eruptive products, analyzed geological structures, and reconstructed the volcanological history of the island, with particular emphasis on the major eruptions of Montagne Pelée including the catastrophic eruption of 1902 which killed about 30 000 people.

Daily field excursions were complemented by working sessions at the observatory, offering insight into multiparameter monitoring tools (seismology, geochemistry, ground deformation), their role in anticipating volcanic hazards and providing science-based decision support and information to authorities in charge of civil protection.

An active and collaborative learning approach

At the heart of the program lies a pedagogy based on the constant interaction between field observations, scientific analysis, and collective work. National and international students worked in pairs on scientific articles, which they examined in light of their own observations.

Five main themes structured their work:

- The geodynamic context of the Lesser Antilles arc,
- The geology of Martinique,
- The eruptive history of Montagne Pelée,
- The activity of Mount Pelée recorded by the OVSM-IPGP,
- The associated volcanic hazards and risks.





Cette approche intégrée permet de développer des compétences essentielles : lecture critique de la littérature scientifique, capacité d'analyse sur le terrain, vision intégrée transdisciplinaire des problématiques scientifiques en réponse aux attentes sociétales et restitution orale argumentée.

Une immersion dans les réalités opérationnelles

Au-delà de l'apprentissage académique, ce field course offre une immersion dans les conditions réelles du travail de volcanologue. Les étudiants ont ainsi participé à des ateliers pratiques au sein de l'OVSM (analyse de signaux sismiques, interprétation de données, suivi de l'activité), et ont été confrontés aux contraintes du terrain tropical : conditions météorologiques changeantes, relief escarpé, accès difficile à certains affleurements.

Cette confrontation directe aux réalités du terrain constitue un levier essentiel pour former les futures générations de scientifiques capables d'intervenir en contexte de crise.

This integrated approach fosters the development of essential skills: critical reading of scientific literature, field-based analytical capabilities, an integrated vision of the transdisciplinary approach necessary to address scientific challenges posed by societal demands, and well-argued oral presentations.

Immersion in operational realities

Beyond academic learning, this field course provides immersion in the real-world conditions of volcanological work. Students took part in practical workshops at the OVSM, including seismic signal analysis, data interpretation, and activity monitoring, and were confronted with the constraints of tropical fieldwork: rapidly changing weather conditions, steep terrain, and difficult access to certain outcrops.

This direct exposure to field realities is a key driver in training future generations of scientists capable of operating in crisis situations.





Former à la science et à la décision

En combinant enseignement théorique, pratique de terrain et immersion dans un observatoire en activité, l'IPGP propose une formation complète, à l'interface entre recherche et gestion des risques. L'évaluation finale, sous forme de présentation orale, vient consacrer cette montée en compétences, en mobilisant à la fois connaissances scientifiques, esprit critique et capacité de synthèse.

Training in science and decision-making

By combining theoretical instruction, field practice, and immersion in an active observatory, IPGP offers a comprehensive training program at the interface between research and risk management. The final assessment, in the form of an oral presentation, consolidates this progression by mobilizing scientific knowledge, critical thinking, and the ability to synthesize complex information.



Les photos de cette article dévoilent des étudiantes et étudiants en immersion scientifique sur le terrain en Martinique, lors d'une formation intensive de dix jours encadrée par Jean-Christophe Komorowski et Guillaume Carazzo, en collaboration étroite avec l'Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique (OVSM-IPGP).

The photographs featured in this article show students immersed in a scientific field environment in Martinique during an intensive ten-day training course supervised by Jean-Christophe Komorowski and Guillaume Carazzo, in close collaboration with the Martinique Volcanological and Seismological Observatory (OVSM-IPGP).



Clément De Sagazan

Architecture et dynamique du système magmatique du Fani Maoré : apports des modèles numériques Architecture and dynamics of the Fani Maoré magmatic system: insights from numerical models

Ma thèse présente des modèles numériques étudiant l'architecture et la dynamique du système magmatique alimentant le volcan Fani Maoré, situé 50 km au large de Mayotte.

Mayotte a connu du volcanisme géologiquement récent (26 millions d'années à 4000 ans), mais pas au cours des temps historiques. De plus, la sismicité avant 2018 était modérée. Or, en mai 2018, l'éruption du Fani Maoré a pris la population et les scientifiques par surprise en provoquant une crise sismique et un enfoncement de l'île vers l'est de 20 cm environ. L'éruption a duré jusqu'à fin 2020, mais le volcan est encore surveillé par le REVOSIMA (le Réseau de Surveillance Volcanique et Sismique de Mayotte, dont l'IPGP fait partie), et on détecte encore des séismes quotidiens et des émissions de CO₂.

Pour comprendre et anticiper le fonctionnement de ce volcan sous-marin, qui représente un aléa pour Mayotte, il faut connaître l'organisation profonde du système de « plomberie » qui l'alimente (réservoirs de magma, conduits,...). Les observations de surface depuis 2018 (sismicité, géodésie, pétrologie...) ont révélé un système exceptionnellement profond (45 à 25 km, dans le manteau) et d'architecture complexe. En particulier, les séismes sont répartis en un essaim « distal », 30 à 50 km à l'est de Mayotte, proche du Fani

My thesis presents numerical models that study the architecture and dynamics of the magmatic system feeding Fani Maoré volcano, 50 km offshore Mayotte.

Mayotte has experienced geologically recent volcanism (26 million years to 4000 years), but none in historical times. Besides, before 2018, the seismicity was moderate. However, in May 2018, the eruption of Fani Maoré took the population and scientists by surprise by triggering a seismic crisis and an eastward subsidence of the island amounting to 20 cm. The eruption lasted until late 2020, but the volcano is still monitored by the REVOSIMA (Volcanic and Seismic Surveillance Network of Mayotte, to which IPGP participates), and earthquakes and CO₂ emissions are still detected.

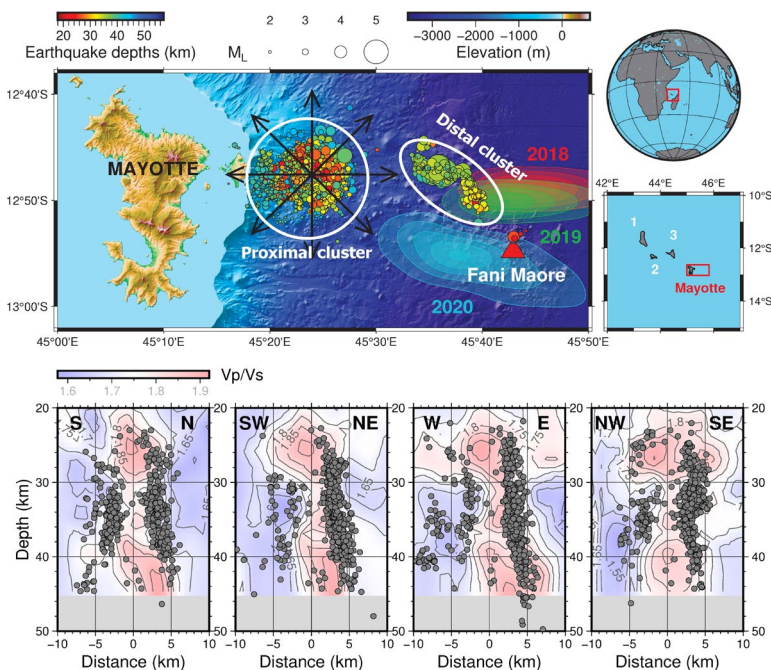
To understand the dynamics of this submarine volcano, which represents a hazard for Mayotte, we need to know the deep organization of its « plumbing » system (magma reservoirs, conduits...). Surface observations since 2018 (seismicity, geodesy, petrology...) have revealed an exceptionally deep (45-25 km, in the mantle) and complex system. In particular, earthquakes are distributed between a “distal” cluster, 30 to 50 km east of Mayotte, close to Fani Maoré, and a

Maoré, et un essaim « proximal », centré à 10 km à l'est de l'île. Néanmoins, de larges incertitudes demeurent sur les données, d'où l'intérêt de la modélisation numérique pour affiner notre compréhension du système alimentant le Fani Maoré.

J'ai d'abord étudié l'essaim proximal. Sa forme conique évoque celle des essaims sismiques associés aux effondrements de caldera, mais ici la sismicité demeure loin du plancher océanique. Une étude tomographique a montré que l'essaim pourrait résulter de l'interaction mécanique de deux réservoirs superposés. J'ai utilisé COMSOL Multiphysics pour produire des modèles 2D de réservoirs pressurisés dans le manteau. En calculant les champs de contrainte et de déformation autour des réservoirs, j'ai ainsi exploré sous quelles conditions la distribution de la sismicité peut être reproduite par la distribution de la fracturation dans les modèles. J'ai montré qu'une zone de faille conique peut se développer entre les réservoirs quand l'un des deux est pressurisé et l'autre est dépressurisé. Ceci signifie que, si l'essentiel du magma a été évacué vers Fani Maoré, une partie a pu migrer vers le haut pour remplir un réservoir à 20-25 km de profondeur proche de l'île. L'ajout d'un troisième réservoir en déflation, plus à l'est, conserve cette explication sur l'essaim proximal tout en reproduisant mieux les déplacements de surface mesurés par GNSS sur Mayotte.

“proximal” cluster, centered 10 km east of the island. Nonetheless, large uncertainties remain on the data, which justifies the use of numerical models to refine our understanding of the Fani Maoré feeding system.

I first studied the proximal cluster. Its conical shape evokes that of the earthquake swarms associated with caldera collapse events, but here the seismicity remains far from the seafloor. A tomography study has suggested that the proximal cluster could result from the mechanical interaction of two superimposed magma reservoirs. I used COMSOL Multiphysics to produce 2D models of pressurized magma reservoirs in the mantle. By computing stress and strain fields around the reservoirs, I investigated the conditions generating a modeled fracture distribution that matches the observed earthquake distribution. I showed that a conical fault zone can appear between reservoirs when one is underpressurized and the other is overpressurized. This means that, while most of the magma has migrated east towards Fani Maoré, some of it could have ascended and filled a 20-25-km-deep magma reservoir close to Mayotte island. Adding a third deflated reservoir to the east is still compatible with this explanation of the proximal cluster's origin, while improving the fit between modeled and measured ground displacements on Mayotte.



Observations géophysiques sur l'éruption de 2018 au large de Mayotte. Haut: sismicité (Lavyssière et al., 2022) et sources de déformation (Peltier et al., 2022). Les flèches montrent les orientations des coupes dessous. ML: magnitude locale. Contours: densité de probabilité pour les sources de déflation calculées à partir des données GNSS (Peltier et al., 2022), pour 2018 (rouge), 2019 (vert) et 2020 (cyan). Bas: coupes de l'essaim proximal. Contours: rapport Vp/Vs de la tomographie de Foix et al. (2021). Les zones en-dessous de 45 km de profondeur ne sont pas résolues.

Geophysical observations of the 2018 eruption near Mayotte. Top: seismicity distribution (Lavyssière et al., 2022) and deformation sources (Peltier et al., 2022). The arrows show the orientation of the cross-sections below. ML: local magnitude. Contours: probability density function of GNSS-derived deflation sources (Peltier et al., 2022) for 2018 (red), 2019 (green) and 2020 (cyan). Bottom: 2-km-wide cross-sections of the proximal cluster. Contours: Vp/Vs ratio from seismic tomography (Foix et al., 2021). Areas below 45 km depth (in gray) are unresolved.



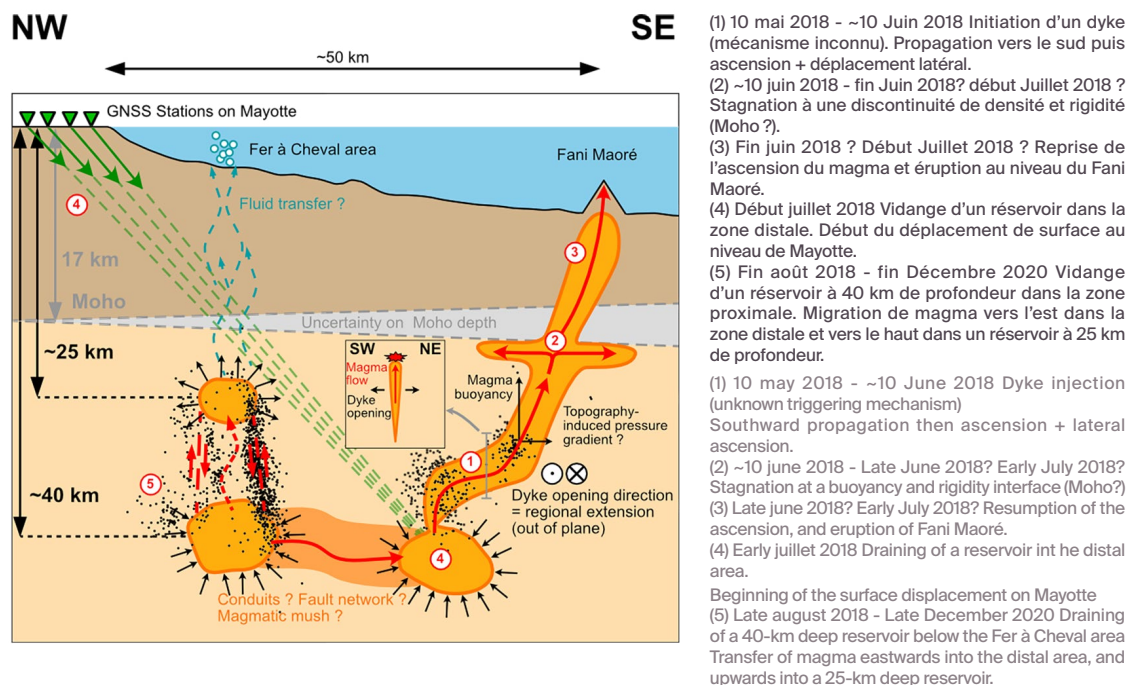
Je me suis aussi penché sur la mise en place de l'essai distal, qui a marqué l'ascension d'un dyke (fissure verticale) transportant le magma du manteau au plancher océanique en mai-juin 2018. En utilisant un code simulant une propagation de dyke, j'ai étudié l'effet de différents paramètres (viscosité du magma, dimensions du dyke, résistance du milieu, effets d'une discontinuité lithologique...) sur le temps d'ascension du magma. D'après mes modèles, il semble probable qu'une discontinuité comme la limite manteau-croûte (Moho) ait fait stagner le magma en profondeur, ce qui implique que la remontée ne se serait pas fait d'un coup mais par étapes.

Ce travail apporte une explication mécanique à certains aspects du fonctionnement du Fani Maoré, et ouvre la voie à d'autres modèles plus complexes physiquement, voire à des modèles prédictifs (estimation de temps de remontée de magma pour l'élaboration de scénarios d'éruption). J'espère aussi que les méthodes que j'ai employées pourront servir dans l'étude d'autres systèmes magmatiques complexes sur la planète.

I also focused on the initiation of the distal cluster, which marked the ascension of a dyke (vertical planar fissure) that transported the magma from the mantle to the seafloor in May-June 2018. By using a code that simulates dyke propagation, I studied the effect of different parameters (magma viscosity, dyke dimensions, host rock resistance, lithological discontinuities...) on the magma's ascent time.

According to my models, it seems likely that a discontinuity, like the crust-mantle boundary (Moho) caused the magma to stall at depth, which implies that the ascent did not happen in one but in several steps.

This work proposes a mechanical explanation on some aspects of the dynamics of Fani Maoré, and opens the way for other models, implementing more complex physics, or even predictive models (for instance, estimating magma ascent times in order to elaborate scenarios for future eruptions). I also hope that the methods I used may be useful in the study of other complex magmatic systems on the planet.



Docteurant	Clément De Sagazan
PhD candidate	desagazan@ipgp.fr
Directeurs de thèse	Aline Peltier peltier@ipgp.fr
PhD supervisors	Wayne Crawford crawford@ipgp.fr



Marine Gelin

Dynamique des colloïdes naturels dans la zone critique volcanique : de l'altération des versants aux systèmes fluviaux

Natural colloidal pathways in the volcanic critical zone from hillslope weathering to river systems

Les colloïdes naturels, particules de taille comprise entre 1 nm et 1 μm , représentent l'un des flux majeurs de matière dans la zone critique, largement supérieurs aux apports anthropiques. Ces particules jouent un rôle déterminant dans le transfert des nutriments des continents vers les océans ainsi que dans le transport des contaminants adsorbés à leur surface. Pourtant, les mécanismes régissant la formation, la stabilisation et le devenir des colloïdes naturels qu'il s'agisse de minéraux argileux, d'oxyhydroxydes métalliques ou de macromolécules organiques demeurent insuffisamment compris. Des incertitudes majeures persistent concernant les processus qui contrôlent la formation et l'export des colloïdes dans des bassins versants développés sur un substrat basaltique jeune, ainsi que sur l'influence du développement pédologique sur l'intensité de ces flux.

Natural colloids are particles that range in size from 1 nm to 1 μm . They represent one of the major material fluxes within the critical zone, far exceeding anthropogenic inputs. They play a key role in transferring nutrients from continents to the oceans and transporting contaminants that are adsorbed onto their surfaces. Despite their importance, the mechanisms that govern the formation, stabilization, and fate of natural colloids, including clay minerals, metal oxyhydroxides, and organic macromolecules, remain poorly understood. There are significant uncertainties regarding the processes that control colloid formation and export in catchments formed on young basaltic substrates, and the influence of pedological development on the magnitude of these fluxes.

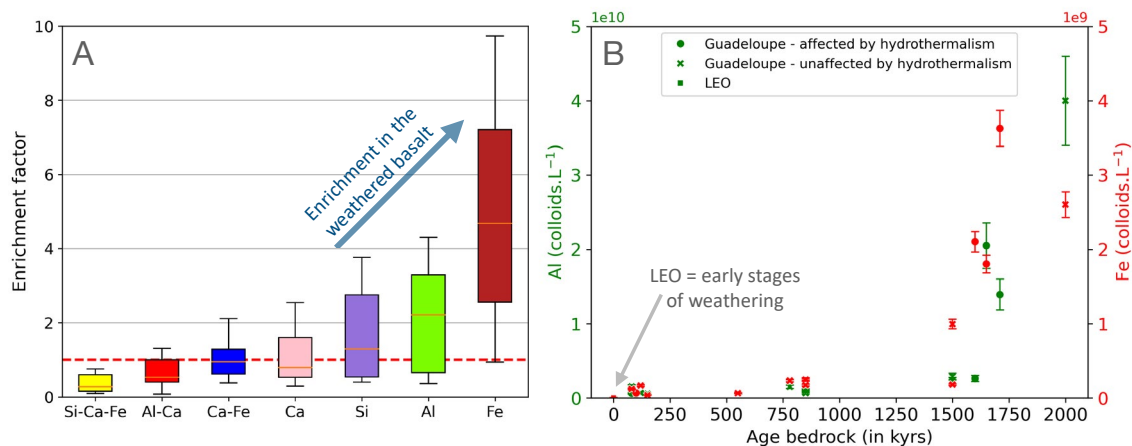


Cette thèse de doctorat, financée par le programme « 80 Prime » entre le CNRS et l'Université d'Arizona, repose sur deux sites d'étude complémentaires représentant différents stades d'altération d'un substrat basaltique : (i) le Landscape Evolution Observatory (LEO, Tucson, AZ, USA), un système expérimental contrôlé correspondant à un stade juvénile de l'altération (12 ans), et (ii) un ensemble de rivières (dont certaines font partie du SNO ObsErA) drainant des roches volcaniques d'âge de ≈ 0 à 2.8 Ma sur Basse-Terre, en Guadeloupe. Cette approche permet d'étudier la formation et la mobilisation des colloïdes depuis les premiers stades de la pédogenèse jusqu'aux sols matures. Les eaux d'effluent et les suspensions de poudres basaltiques ont été analysées par spectrométrie de masse ICP à haute résolution et à temps de vol en mode particule unique (spHR-ICP-MS et splCP-TOFMS).

Dans le cadre du site expérimental LEO (i), les résultats montrent que l'altération précoce génère principalement des colloïdes mono-élémentaires (Ca, Si, Al, Fe), avec un enrichissement notable des phases porteuses d'Al et de Fe (Figure A), remettant en question les hypothèses privilégiant une cinétique rapide de formation d'aluminosilicates faiblement cristallisés dans les stades précoces de l'altération. Lors d'un événement d'infiltration succédant à une

This doctoral research, funded through the "80 Prime" program between the CNRS and the University of Arizona, is based on two complementary study sites representing distinct stages of basalt weathering: (i) the Landscape Evolution Observatory (LEO) in Tucson, Arizona, USA, which is a controlled experimental system corresponding to an early stage of weathering (12 years), and (ii) a series of rivers (some of them part of the ObsErA observatory) draining volcanic rocks spans an age gradient from approximately 0 to 2.8 Myrs on the island of Basse-Terre, Guadeloupe. This combined approach allows us to investigate colloid formation and mobilization from the earliest stages of pedogenesis through to mature soils. Effluent waters and basalt powder suspensions were analyzed using high-resolution and time-of-flight ICP mass spectrometry in single-particle mode (spHR-ICP-MS and splCP-TOFMS).

At the experimental LEO site (i), the results indicate that early weathering predominantly produces mono-elemental colloids (Ca, Si, Al, Fe), with a notable increase in Al- and Fe-containing colloidal phases (Figure A). These findings challenge the commonly held assumption that poorly crystalline aluminosilicates form rapidly during the initial stages of weathering. During an infiltration event following a prolonged dry



A) Concentrations de différentes familles de colloïdes (normalisées par rapport à celle de colloïdes de type feldspath, utilisé comme minéral de référence), dans le basalte altéré du LEO (Tucson, AZ, USA) par rapport au basalte non altéré. La ligne rouge horizontale correspond à une libération identique d'une famille colloïdale entre le basalte non altéré et le basalte altéré.

B) Concentrations colloïdales d'Al (en vert) et de Fe (en rouge) (en colloïdes. L⁻¹) mesurées dans les rivières de Basse-Terre et dans le mésocosme du LEO en fonction de l'âge d'altération du substrat rocheux drainé par la rivière.

A) Concentrations of various colloidal clusters (normalized to the concentration of feldspar colloids, used as a conservative component), in the LEO weathered basalt relative to the pristine basalt. The horizontal red line corresponds to the same release of the considered colloidal cluster in the pristine and weathered basalt.

B) Al (in green) and Fe (in red) colloidal concentrations (in colloids. L⁻¹) measured in rivers in Basse-Terre and in the basaltic mesocosm of the Landscape Evolution Observatory (LEO) plotted against the age of weathered bedrock.



période de sécheresse prolongée (90 jours), les flux élémentaires sont dominés par la phase dissoute, y compris pour des éléments tels que l'Al et le Fe associés à des phases peu solubles, indiquant une contribution limitée de l'export des colloïdes aux stades précoces du développement pédologique. Par ailleurs, les relations concentration-débit révèlent, pour un même élément, des comportements différents entre leur forme colloïdale et dissoute, suggérant l'existence de contrôles hydrologiques distincts.

En complément, l'étude menée en Guadeloupe (ii) sur des bassins versants naturels d'âges contrastés met en évidence une fraction colloïdale majoritairement composée de phases mono-élémentaires riches en Al et en Fe, bien que les sols soient dominés par des aluminosilicates. L'âge de la roche mère apparaît comme un facteur clé dans l'export des colloïdes fluviaux : les bassins versants les plus anciens présentent des concentrations colloïdales fluviales plus élevées (Figure B). Par ailleurs, avec la progression de l'altération, l'export colloïdal augmente progressivement par rapport à la phase dissoute jusqu'à dominer les flux élémentaires dans les bassins versants âgés de plus de 1 Ma.

period of 90 days, elemental fluxes were dominated by the dissolved phase, including for elements such as Al and Fe that are associated with insoluble phases. This indicates a limited contribution of colloidal export during the early stage of pedogenesis. Furthermore, concentration-discharge relationships reveal distinct behaviors between the colloidal and dissolved forms of the same element, suggesting that different hydrological controls are present.

Complementary investigations conducted in Guadeloupe (ii) across natural catchments of different ages, show that, despite soils being dominated by aluminosilicates, the colloidal fraction is largely composed of mono-elemental phases enriched in Al and Fe. The age of the parent rock is a key factor controlling fluvial colloid export: older catchments exhibit higher colloidal concentrations (Figure B). Furthermore, as weathering progresses, colloidal export progressively increases relative to the dissolved phase until it dominates elemental fluxes in catchments older than 1 Myr.

Doctorante	Marine Gelin
PhD candidate	<i>gelin@ipgp.fr</i>
Directeurs de thèse	Marc Benedetti <i>benedetti@ipgp.fr</i>
PhD supervisors	Julien Bouchez <i>bouchez@ipgp.fr</i> - Mickaël Tharaud <i>tharaud@ipgp.fr</i>





Partenariats et relations internationales

Partnerships and international relationships



■ Hydrogène naturel : accélérer la compréhension d'une ressource émergente Natural hydrogen: accelerating the understanding of an emerging resource

À la croisée de la recherche fondamentale et des enjeux énergétiques, l'hydrogène naturel s'impose comme une ressource émergente à fort potentiel. La chaire HCONT, portée par Isabelle Martinez, explore les mécanismes complexes de sa formation, de sa circulation et de son stockage dans le sous-sol. Les résultats obtenus en 2025 apportent des avancées décisives sur les processus de génération et les interactions chimiques et biologiques associées. En parallèle, des approches intégrées, combinant terrain, laboratoire et modélisation, ouvrent la voie à une exploration plus ciblée. Ces travaux contribuent à structurer une nouvelle filière au service de la transition énergétique.

Dans le contexte de la transition énergétique, l'hydrogène moléculaire (H₂) comme ressource alternative suscite un intérêt croissant pour décarboner notre énergie. Mais aujourd'hui, il est encore majoritairement produit à partir de méthane, un procédé fortement émetteur de dioxyde de carbone (CO₂). À l'inverse, l'hydrogène naturel – généré spontanément dans le sous-sol par des processus géologiques – apparaît comme une possible ressource énergétique, dont le potentiel reste à évaluer.

C'est dans cette dynamique que s'inscrit la chaire HCONT qui vise à mieux comprendre les mécanismes de production, de transformation, de transport et de stockage de l'hydrogène dans le sous-sol. L'objectif est double : lever les incertitudes scientifiques et contribuer à définir des stratégies d'exploration plus efficaces.

Des signaux prometteurs, en France et à l'international

Ces dernières années, la détection d'émanations d'hydrogène en surface a permis d'identifier plusieurs zones à fort potentiel à travers le monde (USA, Australie, Amérique latine, ...). En France, dans le piémont pyrénéen, les travaux académiques, la relecture des données de l'exploration et la mise en évidence d'émanations diffuses d'H₂ au niveau de grandes failles a initié une nouvelle phase d'exploration et plusieurs permis ont été déposés sur cette zone dès 2023.

Dans le bassin lorrain, la découverte de fortes concentrations d'hydrogène dissous dans les aquifères du bassin houiller a également suscité un vif intérêt et de nombreux débats autour de ce réservoir potentiel.

Ces observations confirment l'existence de systèmes générateurs d'H₂ en profondeur, mais elles posent aussi une question clé : existe-t-il des accumulations dans le sous-sol

At the crossroads of fundamental research and energy challenges, natural hydrogen is emerging as a resource with significant potential. The HCONT Chair, led by Isabelle Martinez, investigates the complex mechanisms governing its generation, circulation, and storage in the subsurface. Results obtained in 2025 provide key insights into production processes and associated chemical and biological interactions. At the same time, integrated approaches combining field-work, laboratory experiments, and modeling are paving the way for more targeted exploration. This research contributes to structuring a new energy sector supporting the energy transition.

In the context of the energy transition, molecular hydrogen (H₂) as an alternative resource is attracting growing interest for decarbonizing our energy systems. However, it is still predominantly produced from methane, a process that emits significant amounts of carbon dioxide (CO₂). In contrast, natural hydrogen—spontaneously generated in the subsurface through geological processes—appears as a potential energy resource whose true potential remains to be assessed.

It is within this context that the HCONT Chair aims to improve our understanding of the mechanisms of hydrogen production, transformation, transport, and storage in the subsurface. The objective is twofold: to reduce scientific uncertainties and to help define more efficient exploration strategies.

Promising signals in France and worldwide

In recent years, the detection of hydrogen emissions at the surface has led to the identification of several high-potential areas worldwide (USA, Australia, Latin America, etc.). In France, in the Pyrenean foreland, academic studies, along with the reinterpretation of exploration data and the identification of diffuse H₂ emissions along major faults, have initiated a new phase of exploration, with several permits granted in this area as early as 2023.

In the Lorraine Basin, the discovery of high concentrations of dissolved hydrogen in coal basin aquifers has also generated strong interest and sparked numerous debates regarding this potential reservoir.

These observations confirm the existence of deep H₂-generating systems but also raise a key question: do subsurface accumulations exist, and how can they be



et comment les localiser (et quantifier les réserves associées) de manière fiable ? La chaire HCONT souhaite contribuer à cet enjeu en développant des approches intégrées combinant observations de terrain, expérimentations en laboratoire et modélisation. Deux équipes de l'IPGP sont investies sur ces questions et le projet est de fédérer d'autres chercheurs notamment géophysiciens pour l'imagerie du sous-sol.

2025 : focus sur les mécanismes fondamentaux de génération

L'année 2025 a été marquée par des résultats importants sur les processus de production et de consommation de l'hydrogène.

Les travaux menés sur des roches anciennes riches en fer, appelées formations de fer rubanées (BIF), ont permis de mieux comprendre certaines réactions clés. En conditions dépourvues d'oxygène, l'altération aqueuse de minéraux ferreux peut produire de l'hydrogène via la réduction chimique de l'eau et l'oxydation du fer. Sur un assemblage sidérite (un carbonate de fer- FeCO_3)-magnétite (un oxyde de fer- Fe_3O_4), les expériences ont montré que la sidérite est capable de générer du H_2 lors de sa dissolution. À l'inverse, la magnétite ne produit pas d'hydrogène et peut même en limiter la formation en consommant une partie.

Ces résultats mettent en évidence le rôle complexe du fer dans la chimie redox de la lithosphère et soulignent que la quantité d' H_2 produite dépend, entre autres, de la nature des minéraux mis en jeu et des voies de transformations.

Une ressource dynamique et réactive

Loin d'être inerte, l' H_2 produit dans le sous-sol est un acteur chimique et biologique majeur au cœur de réactions rapides et complexes. Très réactif, il est ainsi continuellement consommé par des réactions chimiques abiotiques, mais aussi par des micro-organismes qui exploitent son potentiel énergétique.

L'hydrogène peut réagir avec de nombreux éléments comme le fer, le soufre, l'azote mais également le carbone pour former des composés organiques comme du méthane. Dans les premiers kilomètres de la croûte terrestre, ce sont les micro-organismes qui cyclent l' H_2 : comme cela a été mis en évidence en 2025 dans des aquifères profonds du val d'Aoste (Alpes italiennes) certaines communautés utilisent l'hydrogène comme source d'énergie, tandis que d'autres en produisent, bien que toutes les voies métaboliques n'aient pas encore été clairement identifiées et limitent encore le bilan. L'étude de ces écosystèmes microbiens constitue toutefois un outil précieux pour détecter la présence d'hydrogène en profondeur et comprendre les conditions de son accumulation ou de sa consommation.

reliably located and quantified? The HCONT Chair aims to address this issue by developing integrated approaches combining field observations, laboratory experiments, and modeling. Two IPGP research teams are currently involved, with plans to bring together additional researchers, particularly geophysicists specializing in subsurface imaging.

2025: focus on fundamental generation mechanisms

The year 2025 was marked by significant advances in understanding hydrogen production and consumption processes.

Studies conducted on ancient iron-rich rocks, known as banded iron formations (BIFs), have shed light on key reactions. Under oxygen-free conditions, the aqueous alteration of ferrous minerals can produce hydrogen through the chemical reduction of water and the oxidation of iron. Experiments on a siderite (FeCO_3)-magnetite (Fe_3O_4) assemblage showed that siderite can generate H_2 during its dissolution. In contrast, magnetite does not produce hydrogen and may even limit its formation by consuming part of it.

These results highlight the complex role of iron in lithospheric redox chemistry and show that hydrogen production depends, among other factors, on mineral composition and transformation pathways.

A dynamic and reactive resource

Far from being inert, subsurface H_2 is a major chemical and biological actor involved in rapid and complex reactions. Highly reactive, it is continuously consumed by abiotic chemical reactions and by microorganisms that use it as an energy source.

Hydrogen can react with elements such as iron, sulfur, nitrogen, and carbon, forming organic compounds such as methane. In the first kilometers of the Earth's crust, microorganisms play a key role in cycling H_2 . This was demonstrated in 2025 in deep aquifers of the Aosta Valley (Italian Alps), where some microbial communities use hydrogen as an energy source, while others produce it, although not all metabolic pathways are yet fully understood.

Studying these microbial ecosystems provides valuable tools for detecting hydrogen at depth and understanding the conditions that control its accumulation or consumption.



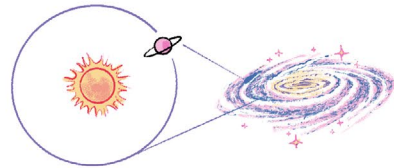
L'HYDROGÈNE, L'ATOME LE PLUS SIMPLE DE L'UNIVERS

LE NUMÉRO 1 DANS LE TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

Hi!

électron
proton

FORMÉ D'UN PROTON ET UN ÉLECTRON, C'EST L'ÉLÉMENT PLUS ABONDANT ! LE COMPOSANT MAJEUR DES ÉTOILES ET DES PLANÈTES GAZEUSES



SUR TERRE, IL EST SURTOUT SOUS FORME D'EAU (H₂O), DONC COMBINÉ AVEC L'OXYGÈNE

EAU

oxygène

JE ME SENS MOINS NÉGATIF



IL S'ASSOCIE AUSSI AU CO₂ POUR FORMER DU MÉTHANE (CH₄)

MÉTHANE

carbone

C'ÉTAIT QUI ?

LE DIHYDROGÈNE, AUSSI APPELÉ H₂, EST LA FORME MOLECULAIRE DE L'HYDROGÈNE

ON SE PARTAGE L'ÉLECTRON ???

OUI !

C'EST PLUS STABLE COMME ÇA

LA GRAVITÉ TERRESTRE N'EST PAS ASSEZ FORTE POUR RETENIR DURABLEMENT L'H₂

UNE FOIS DANS L'ATMOSPHÈRE, IL S'ÉCHAPPE VERS L'ESPACE

BYE

EN PRÉSENCE D'OXYGÈNE, LA COMBUSTION PREND PLACE, CAR ...

CÂLIN DE GROUPE !

... L'H₂ EST TRÈS INFLAMMABLE ...

ÉNERGIE

... PRODUSANT DE L'ÉNERGIE ET DE L'EAU

C'EST UNE RÉACTION PLUS ÉNERGÉTIQUE QUE SI ON BRÛLE DU MÉTHANE !

PRODUIRE DE L'ÉNERGIE ET DE L'EAU PURE EN MÊME TEMPS ?! ON COMPREND ALORS POURQUOI ON ENTEND PARLER DE L'HYDROGÈNE COMME L'ÉNERGIE DU FUTUR !



Ces avancées contribuent à affiner notre compréhension des systèmes naturels et à mieux évaluer leur capacité réelle à produire de l'hydrogène.

Structurer l'exploration : données, modèles et partenariats

Au-delà des processus fondamentaux, la chaire HCONT s'attache à réduire les incertitudes liées à l'exploration. L'un des leviers majeurs consiste à développer des modèles prédictifs capables d'identifier les zones favorables à l'accumulation d'hydrogène.

De ce point de vue, l'année 2025 a été marquée par l'arrivée à l'IPGP de la start-up Terrensis, qui possède deux permis d'exploration dans les Pyrénées-Atlantiques (Sauve-Terre H₂ et Coucourou) et constitue ainsi un partenaire privilégié. Dans ce cadre, une modélisation des transferts de fluide (eau et hydrogène) sera spécifiquement réalisée sur les zones couvertes par ces permis d'exploration, depuis les zones profondes de production jusqu'aux zones d'accumulation potentielles. Ce projet, qui va débiter en 2026, utilisera le logiciel TemisFlow, en collaboration avec l'IFPEN qui a développé et adapté cet outil de modélisation des systèmes pétroliers pour l'H₂. La modélisation sera contrainte par des données géophysiques et géochimiques, et doit permettre à terme de cibler les zones de forage et de réduire le risque exploratoire.

Sur le même thème, nous avons également construit un projet collaboratif avec plusieurs partenaires français (UPPA-Université Pau Pays de l'Adour, ISTERre-Grenoble, Université du Mans et IFPEN), soumis au PEPR sous-sol (non financé en 2025), dans lequel des chercheurs de l'équipe de sismologie de l'IPGP souhaitent développer une approche géophysique innovante pour détecter et suivre la circulation de l'hydrogène dans le sous-sol. Basée sur la sismologie passive, cette méthode consiste à analyser en continu les variations des vitesses des ondes sismiques enregistrées par des réseaux de capteurs déployés sur le terrain. Ces variations, corrélées à des données géochimiques et météorologiques, devraient permettre d'identifier les effets de la circulation et de l'accumulation de fluides, dont H₂. L'objectif est de tester la sismologie passive comme outil de suivi fiable, non invasif, pour l'exploration de l'hydrogène naturel. Ce projet a également permis de renforcer les collaborations entre géochimistes et géophysiciens au sein de l'IPGP et fera l'objet d'une nouvelle soumission en 2026.

These transformations directly influence abiotic processes and improve our understanding of natural systems and their hydrogen production potential.

Structuring exploration: data, models, and partnerships

Beyond fundamental processes, the HCONT Chair seeks to reduce uncertainties related to exploration. A key approach involves developing predictive models capable of identifying favorable zones for hydrogen accumulation.

From this perspective, the year 2025 was marked by the arrival at IPGP of the start-up Terrensis, which holds two exploration permits in the Pyrénées-Atlantiques (Sauve-Terre H₂ and Coucourou) and thus represents a key partner. In this context, fluid transfer modeling (water and hydrogen) will be specifically carried out within the areas covered by these exploration permits, from deep production zones to potential accumulation zones. This project, starting in 2026, will use the TemisFlow software, developed and adapted for hydrogen by IFP Energies nouvelles (IFPEN). The modeling will be constrained by geophysical and geo-chemical data and aims to identify drilling targets and reduce exploration risk.

A related collaborative project was also developed with several French partners (Université de Pau Pays de l'Adour-UPPA, ISTERre-Grenoble, University of Le Mans, and IFPEN). Although not funded in 2025, it involves IPGP seismologists developing an innovative geophysical approach to detect and monitor hydrogen circulation in the subsurface. Based on passive seismology, this method analyzes continuous variations in seismic wave velocities recorded by sensor networks deployed in the field. These variations, correlated with geochemical and meteorological data, could reveal fluid circulation and accumulation, including H₂.

This project has strengthened collaborations between geochemists and geophysicists at IPGP and will be resubmitted in 2026.



Former et diffuser

La chaire HCONT s'inscrit également dans une dynamique de formation et de diffusion des connaissances sur l'hydrogène naturel. Un nouveau cours dédié à la transition énergétique et au rôle de l'hydrogène a été donné en 2025 dans le cadre du Master Géosciences pour l'Anthropocène, en collaboration avec Terrensis.

Nous avons pu présenter des aspects très fondamentaux mais aussi les enjeux industriels liés à l'exploration du potentiel de cette ressource. La réactivité de H₂ est plus largement traitée dans le cours « Organics on the Earth and beyond » du Master Origines.

En parallèle, des actions de médiation ont été engagées, notamment avec la rédaction d'un document de référence pour les pouvoirs publics (DGEC) et la création d'une bande dessinée destinée au grand public en collaboration avec l'illustratrice Sabrina Auguste (voir figure jointe).

Perspectives : vers une exploration plus ciblée

Les travaux menés en 2025 confirment que l'hydrogène naturel constitue une piste sérieuse pour la transition énergétique, tout en soulignant la complexité des systèmes. Les prochaines étapes viseront à approfondir le rôle catalytique de certains minéraux, afin de mieux quantifier l'efficacité des systèmes générateurs, à améliorer la définition des conditions de préservation et à intégrer l'ensemble des processus dans des modèles prédictifs robustes.

À travers ces efforts, la chaire HCONT contribue à faire émerger une nouvelle filière énergétique, à la croisée de la recherche fondamentale et des applications industrielles.

Training and outreach

The HCONT Chair also contributes to education and knowledge dissemination on natural hydrogen. A new course on energy transition and the role of hydrogen was introduced in 2025 in the Master's program Geosciences for the Anthropocene, in collaboration with Terrensis, covering both fundamental aspects and industrial challenges. The reactivity of H₂ is covered in greater detail in the course "Organics on the Earth and beyond" of the Origines Master's program.

Outreach initiatives have also been launched, including the preparation of a reference document for public authorities (DGEC) and the creation of a comic book for the general public in collaboration with illustrator Sabrina Auguste.

Outlook: toward more targeted exploration

The results obtained in 2025 confirm that natural hydrogen is a promising avenue for the energy transition, while also highlighting the complexity of the systems involved. Future work will focus on better understanding the catalytic role of certain minerals, refining the conditions for hydrogen preservation, and integrating all processes into robust predictive models.

Through these efforts, the HCONT Chair contributes to the emergence of a new energy sector at the intersection of fundamental research and industrial applications.



■ Premier colloque conjoint IPGP-INGV, Paris, 5-7 novembre 2025 First IPGP-INGV joint workshop, Paris, 5-7 november 2025

En novembre 2025, L'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) et l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ont organisé leur premier colloque scientifique conjoint, à la suite de la signature en 2024 d'un protocole d'accord (Memorandum of Understanding – MoU) d'une durée de quatre ans visant à renforcer la collaboration bilatérale dans le domaine des sciences de la Terre.

Le colloque a réuni plus de cinquante chercheurs, ingénieurs et experts techniques issus des deux institutions. Il a constitué un cadre structuré d'échanges de connaissances, de données et de méthodes autour de quatre grands domaines scientifiques : Instrumentation et analyse des données, Volcanologie, Tectonique et sismologie, et Événements environnementaux extrêmes et couplage du système Terre. Cet événement a marqué une étape importante dans la consolidation de la coopération entre l'IPGP et l'INGV, ainsi que dans l'identification de priorités scientifiques et technologiques communes.

Le programme s'est articulé autour de quatre sessions thématiques plénières, comprenant au total 28 présentations orales et 46 posters, témoignant du fort intérêt des deux communautés pour le renforcement des échanges interdisciplinaires et le développement de futures activités conjointes. Le programme complet du colloque est disponible en ligne : <https://www.ipgp.fr/en/ipgp-ingv-2025>.

In November 2025, the Institut de physique du globe de Paris (IPGP) and the Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) held their first joint scientific workshop, following the signing in 2024 of a four-year Memorandum of Understanding (MoU) aimed at strengthening bilateral collaboration in Earth sciences.

The workshop brought together more than fifty researchers, engineers, and technical experts from both institutions. It provided a structured forum to exchange knowledge, data, and methodologies across four major scientific domains: Instrumentation and Data Analysis, Volcanology, Tectonics and Seismology, and Extreme Environmental Events and Earth-System Coupling. The event marked an important step in consolidating cooperation between IPGP and INGV and in identifying shared scientific and technological priorities.

The programme was organised around four plenary thematic sessions, with a total of 28 oral presentations and 46 posters, reflecting the strong interest of both communities in enhancing cross-disciplinary exchange and developing future joint activities. The full workshop programme is available online at: <https://www.ipgp.fr/en/ipgp-ingv-2025>.



Participants au premier colloque conjoint IPGP-INGV à Paris du 5 au 7 novembre 2025, réunissant plus de cinquante chercheurs, ingénieurs et experts autour des grands enjeux des sciences de la Terre et du renforcement de la coopération scientifique franco-italienne.
Participants at the first joint IPGP-INGV symposium held in Paris on 5-7 November 2025, bringing together more than fifty researchers, engineers, and experts to discuss major challenges in Earth sciences and to strengthen Franco-Italian scientific cooperation.



Dans l'ensemble, ce premier colloque conjoint a posé des bases solides pour une collaboration durable entre l'IPGP et l'INGV, renforçant les partenariats internationaux de l'IPGP et contribuant au développement d'approches intégrées des sciences du système Terre.

« Ce workshop marque une avancée significative dans la collaboration entre nos deux institutions. [...] En unissant nos forces, nous créons une nouvelle opportunité de renforcer les synergies scientifiques, de partager les infrastructures et les données, et d'accroître notre capacité à répondre aux défis globaux, des aléas naturels au changement climatique. »

Fabio Florindo, Président de l'INGV

« Ce workshop n'est pas seulement une rencontre scientifique ; il constitue le socle d'une alliance stratégique qui bénéficiera à l'ensemble de la communauté européenne des géosciences. »

Marc Chaussidon, Directeur de l'IPGP

Overall, this first joint workshop laid a solid foundation for sustained IPGP-INGV collaboration, reinforcing IPGP's international partnerships and contributing to the development of integrated approaches to Earth-system science.

"This workshop marks a significant step forward in the collaboration between our two institutions. [...] By joining forces, we are creating a new opportunity to strengthen scientific synergies, share infrastructure and data, and enhance our capacity to address global challenges, from natural hazards to climate change."

Fabio Florindo, President of INGV

"This workshop is not only a scientific meeting; it is the foundation of a strategic alliance that will benefit the entire European geoscience community."

Marc Chaussidon, Director of IPGP

**FIRST
IPGP - INGV
WORKSHOP**

Instrumentation and data analysis
Volcanology
Tectonics and Seismology
Extreme Environmental Events and Earth-System Coupling

Paris, November 5 - 7, 2025

Pierre-Jacques Volaire
L'Eruption du Vésuve (c. 1771)
Musée des Beaux-Arts de Brest
<https://www.ipgp.fr/en/ipgp-ingv-2025>

QR code and logos for IPGP and INGV.



PARI : de nouveaux équipements au service de l'analyse de pointe et des enjeux environnementaux

PARI: new instruments advancing cutting-edge analysis and addressing environmental challenges

La plateforme d'analyse haute-résolution (PARI) hébergée à L'Institut de physique du globe de Paris regroupe un grand nombre d'instruments permettant la caractérisation des matériaux, mais également la détermination de leurs compositions élémentaires et isotopiques en s'appuyant sur des équipements de pointe (<https://www.ipgp.fr/la-recherche/plateformes-de-recherche/pari/>).

Nouveaux instruments

L'année 2025 a vu l'arrivée de deux nouveaux équipements au sein de la plateforme PARI : un spectromètre de masse (Perspective, Nu Instruments) pour l'analyse isotopique du CO₂ gazeux et l'application du thermomètre double Δ_{47} - Δ_{48} aux minéraux carbonatés (cf pages 30-31), et un analyseur mercure. Cet analyseur mercure (DMA-80 evo, Milestone) financé dans le cadre de l'appel à projets 2025 Petits et Moyens équipements de l'Université Paris Cité, permet de faire des analyses rapides, sans préparation chimique, des concentrations en mercure avec une précision de l'ordre de 1% sur des très petites quantités de mercure (< 0.1 ng) dans des échantillons solides ou liquides.

L'analyseur peut traiter des matrices très variées, comme par exemples des roches, des minéraux, des sols, des sédiments, mais aussi des échantillons d'eau et des échantillons biologiques (tissus, cheveux, urine, sang). Un défi analytique est de mesurer de très petits

The High-Resolution Analytical Platform (PARI), hosted at the Institut de physique du globe de Paris, brings together a wide range of state-of-the-art instruments dedicated to material characterization, as well as to the determination of their elemental and isotopic compositions. (<https://www.ipgp.fr/la-recherche/plateformes-de-recherche/pari/>).

New instruments

In 2025, two new instruments were added to the PARI platform: a mass spectrometer (Perspective, Nu Instruments) for the isotopic analysis of gaseous CO₂ and the application of the Δ_{47} - Δ_{48} double thermometer to carbonate minerals (see pages 30-31) and a mercury analyzer. The latter (DMA-80 evo, Milestone), funded through the 2025 "Small and Medium Equipment" call of Université Paris Cité, enables rapid mercury concentration analyses without chemical preparation, with a precision of approximately 1% on extremely small quantities (< 0.1 ng) in both solid and liquid samples.

This analyzer can process a wide variety of matrices, including rocks, minerals, soils, and sediments, as well as water and biological samples (tissues, hair, urine, blood). One of the main analytical challenges lies in measuring very small samples (on the order



échantillons (~ milligramme), pour des applications où seulement quelques grains sont disponibles pour l'analyse. La première application de cette méthode a été la mesure de la concentration de mercure dans l'échantillon de l'astéroïde Benu, rapporté sur Terre par la mission NASA OSIRIS-REx.

Benu étant considéré comme l'un des matériaux les plus primitifs du Système solaire accessibles sur Terre, cette analyse a permis, pour la première fois, d'estimer la concentration de mercure dans le Système solaire primitif. L'arrivée de cet analyseur mercure sur la plateforme PARI va permettre d'étendre les sujets de recherche à l'analyse de cet élément critique dans le domaine environnemental, mais aussi dans le domaine médical ou encore en cosmochimie avec en point de mire les futures missions de retour d'échantillons extraterrestres.

Mise en place d'un projet de récupération d'hélium

L'année 2025 a également vu le financement d'un projet de récupération d'hélium, un gaz rare chimiquement inerte. L'hélium est une ressource limitée, concentrée dans quelques pays (e.g., USA, Russie, Algérie, Qatar), dont la disponibilité s'est fortement réduite ces dernières années, entraînant ainsi une hausse importante des coûts pour la recherche. Face à ce défi, l'IPGP et cinq autres laboratoires de l'Université Paris Cité (IBPC, CiTCom, LCBPT, ITODYS, MPQ) ont déposé un projet collectif auprès de l'IDEX Stratex, visant à acquérir des systèmes de recyclage d'hélium.

of a milligram), particularly in cases where only a few grains are available. The first application of this method was the measurement of mercury concentration in samples from the asteroid Benu, returned to Earth by the NASA OSIRIS-REx mission. As Benu is considered one of the most primitive materials in the Solar System accessible on Earth, this analysis allowed, for the first time, to estimate mercury concentrations in the early Solar System. The addition of this mercury analyzer on the PARI platform will open new research avenues, extending investigations of this critical element across environmental science, medical research, and cosmochemistry, particularly in anticipation of future extraterrestrial sample-return missions.

Launch of a helium recovery project

In 2025, funding was also secured for a helium recovery project. Helium, a rare and chemically inert gas, is a limited resource concentrated in a small number of countries (e.g., the United States, Russia, Algeria, and Qatar), and its availability has declined significantly in recent years, leading to rising costs for research. In response to this challenge, IPGP, together with five other laboratories of Université Paris Cité (IBPC, CiTCom, LCBPT, ITODYS, MPQ), submitted a joint proposal to the IDEX Stratex program to acquire helium recycling systems.



La plateforme PARI s'est dotée fin 2025 d'un analyseur mercure à combustion directe pour l'analyse des échantillons liquides et solides. The PARI platform acquired a direct combustion mercury analyzer at the end of 2025 for the analysis of liquid and solid samples.



Un co-financement Stratex-IPGP-CNRS a finalement permis l'achat et l'installation d'un tel système dans nos locaux, dont la mise en fonctionnement est prévue pour l'été 2026.

Scientifiquement, ce dispositif de récupération garantit la continuité des activités analytiques essentielles à l'équipe de Paléomagnétisme, Paléoclimat et Environnement (PAMCE), en permettant notamment de relancer le développement et la mise en fonctionnement du microscope magnétique à capteur SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) de la plateforme PARI. Ce capteur extrêmement précis et sensible permet l'étude des propriétés magnétiques des roches et des sédiments, mais il nécessite une température de fonctionnement d'environ 4 K (-269 °C), atteignable uniquement grâce à de l'hélium à l'état liquide.

Par ailleurs, l'hélium liquide est également indispensable au refroidissement des aimants supraconducteurs générant de forts champs magnétiques et constitue un outil clé pour l'étude des variations d'aimantation à basse température, entre 2 K et 400 K. Sur les plans économique et stratégique, le recyclage d'au moins 70 % des 400 litres d'hélium consommés annuellement permettra une réduction des coûts d'approvisionnement d'environ 60 %, avec un retour sur investissement estimé à six ans. Enfin, cette démarche s'inscrit dans une logique de responsabilité environnementale par une gestion durable d'une ressource rare.

Valorisation auprès du grand public

Le travail réalisé sur les équipements de la plateforme PARI peut également, quand l'occasion s'y prête, être valorisé auprès du grand public. Ce fut le cas en 2025 avec les images colorisées de micro-organismes aquatiques prises par Stephan Borensztajn, sélectionnées pour être présentées lors de la 28^e édition du festival international de la photo animalière et de nature à Montier-en-der (France). Ces images ont été réalisées avec le microscope électronique à balayage SEM-FEG Zeiss Auriga 40 de la plateforme PARI.

Cette technique d'observation, qui utilise non pas de la lumière comme en photographie traditionnelle mais des électrons sous vide poussé, possède notamment un fort pouvoir grossissant (jusqu'à x 1 000 000), parfait pour étudier les micro-organismes aquatiques (tels que les phytoplanctons, zooplanctons, foraminifères, bryozoaires) prélevés dans différentes eaux du globe par des chercheurs des équipes Biogéochimie

Co-funding from Stratex, IPGP and the CNRS ultimately enabled the purchase and installation of such a system on site, with commissioning scheduled for summer 2026.

From a scientific perspective, this recovery system will ensure the continuity of essential analytical activities within the Paleomagnetism, Paleoclimate and Environment team (PAMCE), notably by supporting the development and operation of the SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) magnetic microscope on the PARI platform. This highly sensitive instrument allows for the study of the magnetic properties of rocks and sediments but requires operating temperatures of approximately 4 K (-269 °C), achievable only with liquid helium.

Liquid helium is also indispensable for cooling superconducting magnets that generate strong magnetic fields and is a key tool for investigating magnetization variations at low temperatures, between 2 K and 400 K.

From an economic and strategic point of view, recycling at least 70 % of the 400 liters of helium consumed yearly should allow us to reduce supply costs by approximately 60 %, with a return on investment estimated at six years. This initiative also reflects a strong commitment to environmental responsibility through the sustainable management of a scarce resource.

Raising awareness among the general public

The work carried out using PARI's instruments can also, when appropriate, be shared with the general public. This was the case in 2025 with colorized images of aquatic microorganisms produced by Stephan Borensztajn, which were selected for presentation at the 28th edition of the International Wildlife and Nature Photography Festival in Montier-en-Der (France). These images were obtained using the SEM-FEG Zeiss Auriga 40 scanning electron microscope available on the PARI platform.

This observation technique, which uses electrons under high vacuum rather than light as in conventional photography, offers exceptionally high magnification (up to x1,000,000), making it ideal for studying aquatic microorganisms such as phytoplankton, zooplankton, foraminifera, and bryozoans. These organisms were sampled from waters around the world by researchers

à l'Anthropocène des éléments et contaminants émergents (ACE), Biogéochimie environnementale (BGE) et Géochimie des isotopes stables (GIS) de l'IPGP.

Avant de pouvoir être photographiés, les échantillons d'eaux ont été filtrés, et les micro-organismes figés, fixés et métallisés avec une fine couche d'or. Les images obtenues sont en niveau de gris et ont été colorisées à postériori. La diversité de forme et de géométrie de ces différents micro-organismes aquatiques a permis d'aboutir à des images très esthétiques. Les photos présentées lors de ce festival sont actuellement exposées au rez-de-chaussée de l'Institut de physique du globe de Paris.

from the IPGP teams Biogeochemistry in the Anthropocene (ACE), Environmental Biogeochemistry (BGE), and Stable Isotope Geochemistry (GIS).

Prior to imaging, water samples were filtered, and the microorganisms were fixed, preserved, and coated with a thin layer of gold. The resulting images, originally in grayscale, were subsequently colorized. The remarkable diversity of shapes and geometries observed in these aquatic microorganisms resulted in strikingly aesthetic images. The photographs presented at the festival are currently on display on the ground floor of the Institut de physique du globe de Paris.

▶ **Une vidéo de présentation de la plateforme est également disponible sur la [chaîne YouTube de l'IPGP](#)**

▶ *A presentation video of the platform is also available on the [IPGP YouTube channel](#) through this dedicated playlist.*



Exposition d'images de microorganismes marins prises au microscope électronique à balayage (MEB). Stephan Borensztajn, responsable technique du MEB.

Exhibition of scanning electron microscope (SEM) images of marine microorganisms. Stephan Borensztajn, technical manager of the SEM facility.



Observatoires, thèmes, plateformes et équipes de recherche

Observatories, themes, platforms and research teams

Au 1^{er} septembre 2025 / On 1st of September 2025

Observatoires Observatories

■ Observatoires volcanologiques et sismologiques / Volcanological and Seismological Observatories

Jean-Christophe KOMOROWSKI, Responsable scientifique / Scientific Manager

Jean-Marie SAUREL, Responsable opérationnel / Operational Manager

■ OVSM-IPGP : Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique

Volcanological and Seismological Observatory of Martinique

Jérôme VERGNE

■ OVSG-IPGP : Observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe

Volcanological and Seismological Observatory of Guadeloupe

Ivan VLASTELIC

■ OVPF-IPGP : Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise

Volcanological Observatory of Piton de la Fournaise

Aline PELTIER

■ Observatoires magnétiques / Magnetic Observatories

Vincent LESUR

■ Observatoire GEOSCOPE/ GEOSCOPE Observatory

Martin VALLÉE, Responsable scientifique / Scientific Manager

Nicolas LEROY, Responsable technique / Technical Manager

■ Observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles OBSERA

Observatory of Water and Erosion in the Antilles OBSERA

Éric LAJEUNESSE

■ Centre de données IPGP / IPGP Data Center

Claudio SATRIANO, Responsable scientifique / Scientific Manager

Constanza PARDO, Responsable technique / Technical Manager

■ Observatoire InSight / InSight Observatory

Philippe LOGNONNÉ



Thèmes Themes

■ Intérieurs de la Terre et des planètes / Earth and Planetary Interiors

Cécile PRIGENT
James BADRO

■ Risques naturels / Natural Hazards

Martine SIMOES
François BEAUDUCEL

■ Système Terre / Earth System Science

Charlotte CATROUILLET
Jérôme GAILLARDET

■ Origines / Origins

Bénédicte MÉNEZ
Frédéric MOYNIER

Plateformes et services communs Platforms and shared services

■ Plateau d'analyse haute résolution (PARI) / High-Resolution Analysis Platform (PARI)

Catherine CHAUVEL, Responsable scientifique / Scientific Manager
Mickaël THARAUD, Responsable technique / Technical Manager

■ Service de calcul parallèle et de traitement de données en sciences de la Terre (S-CAPAD)

Parallel Computing and Data Analysis Platform for Earth Science (S-CAPAD)
Alexandre FOURNIER, Responsable scientifique / Scientific Manager
Geneviève MOGUILNY, Responsable technique / Technical Manager

■ Lithothèque marine / Marine Rock Repository

Cécile PRIGENT, Responsable scientifique / Scientific Manager

■ Pôle drones/ Drones Unit

Sébastien BONAIMÉ

■ Service mutualisé de virtualisation/ Shared virtualisation service

Michel LE COCQ



Infrastructures nationales hébergées National hosted infrastructures

■ Parc de sismomètres "fond de mer" INSU-IPGP / INSU-IPGP Ocean-Bottom Seismometers (OBS)

Wayne CRAWFORD, Responsable scientifique / Scientific Manager
Romuald DANIEL, Responsable technique / Technical Manager

■ Centre de coordination et de diffusion de ForM@Ter

Center of Coordination and Distribution of ForM@Ter
Raphaël GRANDIN

■ OZCAR (Observatoires de la zone critique, applications et recherche)

OZCAR (Critical Zone Observatories, Applications and Research)
Jérôme GAILLARDET

■ REVOSIMA : Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte

Volcanological and seismological monitoring network of Mayotte
Aline PELTIER

Équipes Teams

■ Biogéochimie environnementale / Environmental Biogeochemistry

Rémi LOSNO

■ Biogéochimie à l'Anthropocène des éléments et contaminants émergents

Biogeochemistry at the Anthropocene of Elements and Emerging Contaminants
Rémi MARSAC

■ Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale

Cosmochemistry, Astrophysics and Experimental Geophysics
Sébastien CHARNOZ

■ Dynamique des fluides géologiques / Geological Fluid Dynamics

Olivier DEVAUCHELLE

■ Géochimie des enveloppes externes / External Envelopes Geochemistry

Julien BOUCHEZ

■ Géochimie des isotopes stables / Stable Isotope Geochemistry

Cyril Aubaud

■ Géomagnétisme / Geomagnetism

Thomas GASTINE

■ Géomatériaux / Geomaterials

Daniel NEUVILLE



■ **Géomicrobiologie / Geomicrobiology**
Emmanuelle GERARD

■ **Géosciences marines / Marine Geosciences**
Nathalie FEUILLET

■ **Géodésie / Geodesy**
Olivier BOCK

■ **Paléomagnétisme / Paleomagnetism**
Julie CARLUT

■ **Planétologie et sciences spatiales / Planetology and Space Sciences**
Sébastien RODRIGUEZ

■ **Sismologie / Seismology**
Jean-Philippe METAXIAN - Nobuaki FUJI

■ **Systèmes volcaniques / Volcanic Systems**
Fidel COSTA

■ **Tectonique et mécanique de la lithosphère / Lithosphere Tectonics and Mechanics**
Yann KLINGER



Direction, instances et référents

Management, bodies and officers

L'équipe de direction de l'IPGP se compose du directeur de l'établissement (Marc Chaussidon), du directeur général des services (Antoine Charlot), du directeur adjoint chargé du spatial (Yann Klinger), de la directrice adjointe chargée des observatoires (Anne Le Friant), de la directrice adjointe chargée de l'enseignement (Marianne Greff), du directeur adjoint en charge de la recherche et des partenariats (Marc Benedetti) et du directeur adjoint chargé de l'instrumentation (Arnaud Lemarchand).

Le dispositif de pilotage de l'institut s'appuie notamment sur trois instances : un conseil d'administration qui est garant de la politique générale et de la stratégie de l'établissement et vote le budget, un conseil scientifique qui pilote la politique de recherche et un conseil pédagogique qui pilote la politique de formation. On compte également deux autres instances : le comité social d'administration (CSA) et la commission paritaire d'établissement (CPE).

Certains personnels sont nommés par la direction pour remplir des missions particulières d'intérêt général :

- Référente égalités : **Magali Bonifacie**
- Référent déontologie et lanceur d'alerte : **François Métivier**
- Référente Services publics + : **Marianne Greff**
- Référente intégrité scientifique : **Julie Carlut**
- Fonctionnaire sécurité défense : **Antoine Charlot**

The IPGP's management team includes its director (Marc Chaussidon), the general director of services (Antoine Charlot), the deputy director for research and space activities (Yann Klinger), the deputy director for observatories (Anne Le Friant), the deputy director for teaching (Marianne Greff), the deputy director for industrial and international relations (Marc Benedetti) and the deputy director in charge of instrumentation (Arnaud Lemarchand).

The Institute's steering system relies in particular on three bodies: a board which is responsible for the general policy and strategy of the institution and votes the budget, a scientific council which directs the research policy and a pedagogical council which directs the teaching policy. Two other bodies exist: the social administration committee and the joint committee of establishment.

Some staff are appointed by management to carry out specific tasks of general interest:

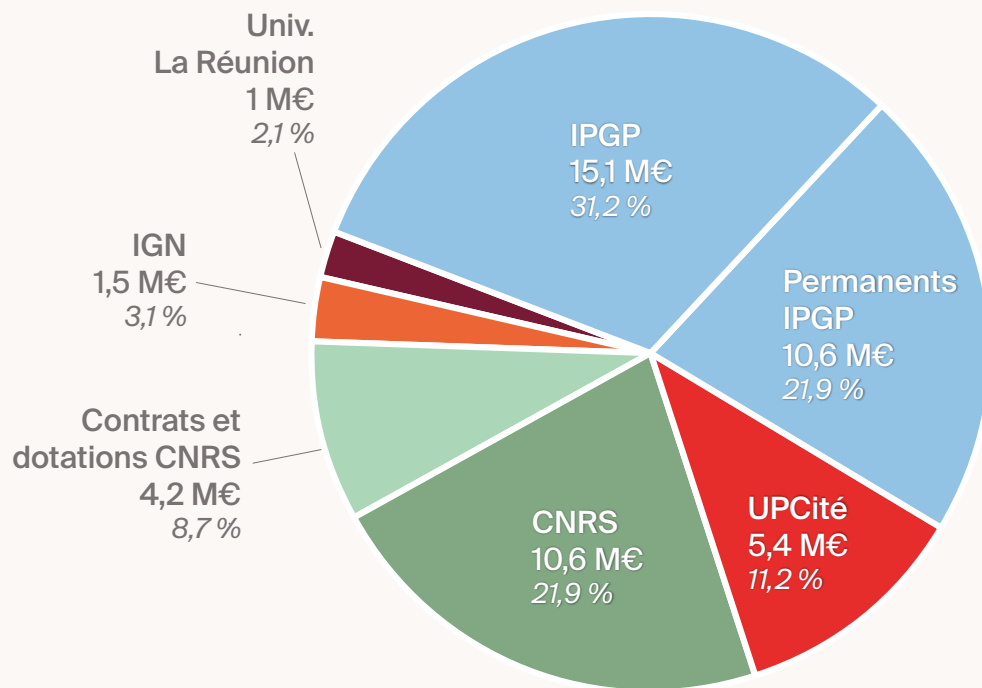
- Equality officer: **Magali Bonifacie**
- Ethics officer and whistleblower: **François Métivier**
- "Public services +" officer: **Marianne Greff**
- Scientific integrity officer: **Julie Carlut**
- Defence security officer: **Antoine Charlot**



Budget

Budget

48,4 millions d'euros (M€)



Le budget IPGP de 15,1 M€ comprend la dotation pour charge de service public de l'IPGP, les contrats et subventions de recherche, ainsi que les dotations des partenaires UPCité et IGN.

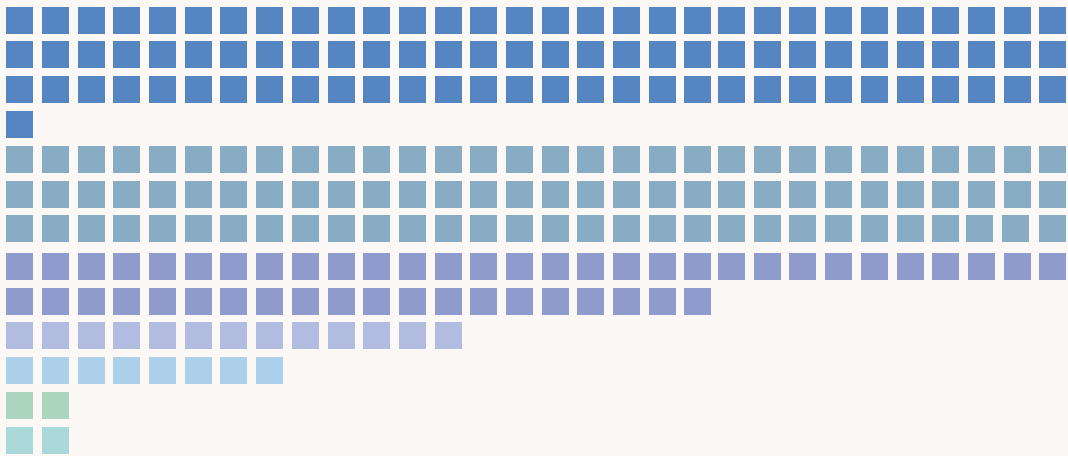
Les sommes indiquées pour les partenaires UPCité, CNRS, IGN et Univ. La Réunion, sont les masses salariales des personnels de ces établissements affectés à l'IPGP.



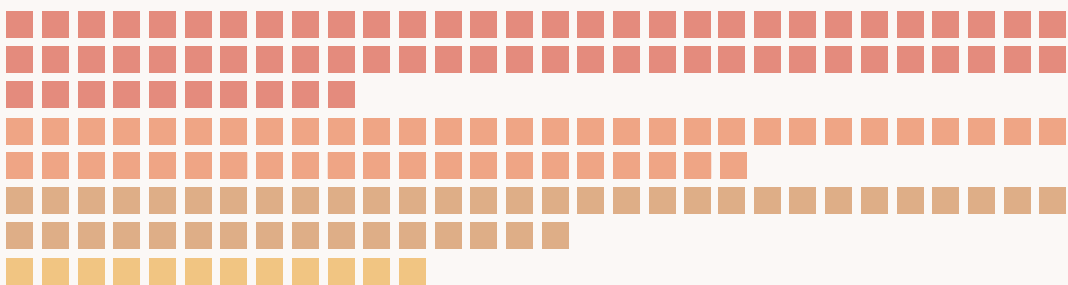
Effectifs Staff

478 personnels en 2025
staff in 2025

256 permanents
permanent staff




222 non permanents
non-permanent staff

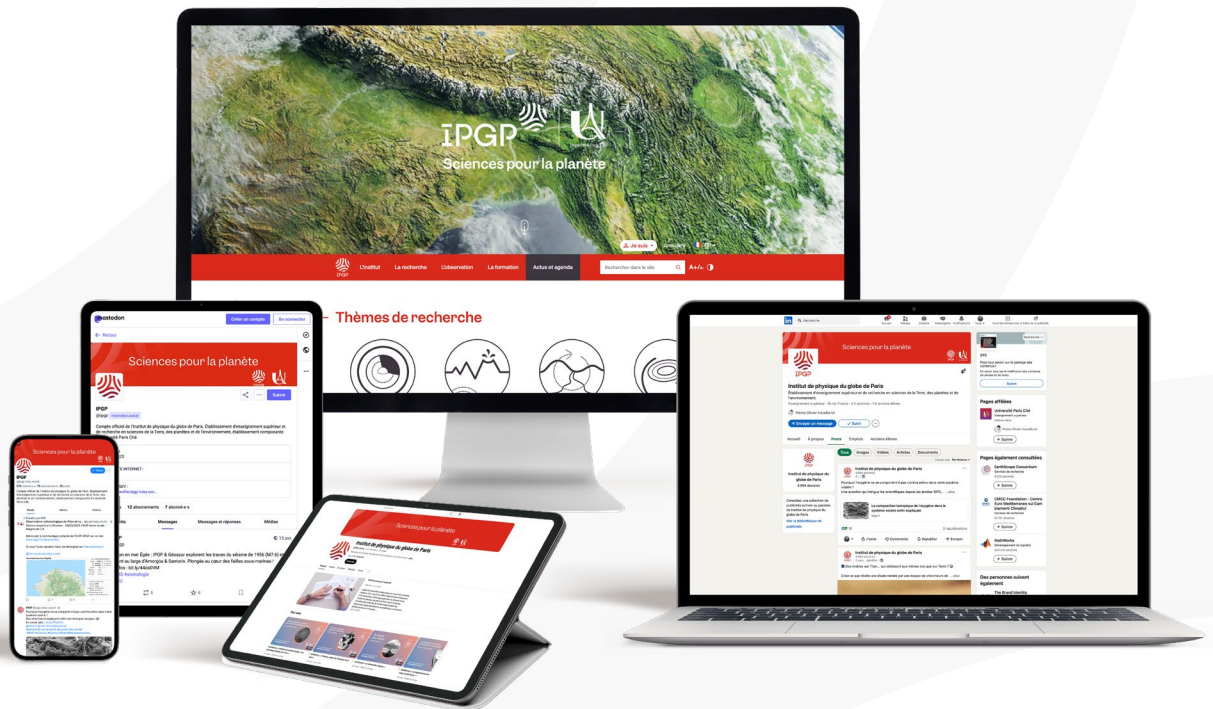




89	personnels IPGP IPGP staff	<ul style="list-style-type: none"> 1 directeur director 1 directeur général des services general director of services 6 professeurs professors 4 maîtres de conférences senior lecturers 13 physiciens CNAP CNAP senior physicists 15 physiciens-adjoints CNAP CNAP physicists 49 IATSS engineers, technicians, administrative staff
90	personnels CNRS CNRS staff	<ul style="list-style-type: none"> 22 directeurs de recherche senior researchers 19 chargés de recherche researchers 49 ITA engineers, technicians, administrative staff
52	personnels Université Paris Cité Université Paris Cité staff	<ul style="list-style-type: none"> 18 professeurs professors 22 maîtres de conférences senior lecturers 12 IATSS engineers, technicians, administrative staff
13	personnels IGN IGN staff	<ul style="list-style-type: none"> 4 directeurs de recherche senior researchers 8 chargés de recherche researchers 1 ingénieur engineer
8	personnels Université de la Réunion University of Reunion Island staff	<ul style="list-style-type: none"> 1 professeur professor 1 physicien-adjoint CNAP CNAP physicist 4 maîtres de conférences senior lecturers 2 IATSS engineers, technicians, administrative staff
2	personnels Collectivité territoriale de Martinique Territorial collectivity of Martinique staff	<ul style="list-style-type: none"> 2 IATSS engineers, technicians, administrative staff
2	personnels IRD IRD staff	<ul style="list-style-type: none"> 2 chargés de recherche researchers
106	doctorants PhD candidates	<ul style="list-style-type: none"> 68 personnels IPGP IPGP staff 7 personnels CNRS CNRS staff 24 personnels Université Paris Cité Université Paris Cité staff
53	post-doctorants post-doctoral fellows	<ul style="list-style-type: none"> 38 personnels IPGP IPGP staff 10 personnels CNRS CNRS staff 5 personnels Université Paris Cité Université Paris Cité staff
51	IATSS engineers, technicians, administrative staff	<ul style="list-style-type: none"> 48 personnels IPGP IPGP staff 3 personnels Université Paris Cité Université Paris Cité staff
12	ITA engineers, technicians, administrative staff	<ul style="list-style-type: none"> 12 personnels CNRS CNRS staff

Rapport annuel Annual report	Institut de physique du globe de Paris 1, rue Jussieu 75238 Paris Cedex 05 <i>www.ipgp.fr</i>
Conception et réalisation Design and production	Service communication – Pierre-Yves Clausee <i>communication@ipgp.fr</i>
Mise en page Layout	Tiphaine Doria / Laëtitia Mas
Rédaction Drafting	Personnels de l'IPGP et service communication. <i>IPGP staff and communication department.</i>
Impression Print 	Imprimerie Mély-Melloni, labellisée PEFC et FSC (papier eco-responsable). <i>Mély-Melloni Printing, labelled PEFC and FSC (eco-friendly paper).</i>
Photos et illustrations Photos and illustrations	Les photographies et illustrations sont issues de la banque d'images de l'IPGP ou des publications scientifiques mentionnées, sauf : photo de couverture Luc Labenne.
MERCI THANK YOU	La direction et le service communication de l'IPGP remercient les chercheurs, enseignants-chercheurs, doctorants, ingénieurs, techniciens et personnels administratifs ayant participé à ce numéro. <i>The IPGP's management team and communication department would like to thank the researchers, professors, PhD candidates, engineers, technicians and administrative staff who participated in this issue.</i>

Restez connectés à la Terre...
et à L'Institut de physique du globe de Paris !
Stay connected to the Earth...
and to the Institut de physique du globe de Paris!



Des entrailles de notre planète aux confins de l'univers, en passant par les fonds océaniques et les volcans actifs: L'Institut de physique du globe de Paris explore les phénomènes qui façonnent le monde et notre avenir.

Suivez l'actualité des sciences pour la planète, découvrez nos dernières recherches, nos événements et les coulisses de la vie scientifique sur nos canaux numériques.

From the depths of our planet to the edges of the universe—through active volcanoes, ocean floors, and seismic activity—the Institut de physique du globe de Paris explores the phenomena shaping our world and its future.

Follow the latest in science for the planet, and dive into our research updates, events, and behind-the-scenes glimpses of scientific life on our digital platforms.

www.ipgp.fr

 Institut de physique du globe de Paris  @IPGP_officiel

 @ipgp.bsky.social  @ipgp@mastodon.social  @IPGP_officiel

