



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Rapport annuel - Annual report 2024

Institut de physique du globe de Paris



En couverture

In cover

Dépôt d'avalanches de roches issus des effondrements du flanc Est du bras de Mahavel (Rivière des Remparts, La Réunion) en 1965, 1995 et 2001. Ces dépôts sont constitués de particules allant du sable au bloc de plus de 2 m de largeur et sont remobilisés par la rivière lors de crues provoquées par les précipitations extrêmes, menaçant ainsi les infrastructures de la ville de Saint Joseph située en aval.

Rock avalanche deposits resulting from the collapse of the eastern flank of the Mahavel arm (Rivière des Remparts, La Réunion) in 1965, 1995 and 2001. These deposits are made up of particles ranging from sand to boulders over 2 m wide, and are remobilized by the river during floods caused by extreme precipitation, threatening the infrastructure of the downstream town of Saint Joseph.

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
	En images In pictures	06
	Focus : Edouard Kaminski Président de l'Université Paris Cité Focus : Edouard Kaminski – President of Université Paris Cité	12
	Nouveaux projets de recherche New Research Projects	14
	Focus : Labex UnivEarth Focus : Labex UnivEarth	20
	Nouveaux instruments New instruments	25
	Prix et distinctions Awards and honours	34
	Nouveaux chercheurs et enseignants-chercheurs New researchers and professors	37
	Thèmes IPGP IPGP themes	43
	Intérieurs de la Terre et des planètes Earth and Planetary Interiors	43
	Risques naturels Natural Hazards	53
	Système Terre Earth System Science	65
	Origines Origins	73
	Focus : Comprendre l'origine de la Lune à partir des échantillons ramenés par les missions d'Apollo à Chang'e Understanding the Origin of the Moon from Samples Returned by Apollo to Chang'e Missions	82
	Observatoires Observatories	89
	Focus : NanoMagSat Focus : NanoMagSat	126
	Enseignement Education	135
	Focus : Deux thèses Focus : Two theses Linru Fang Augustin Maller	142 142 144
	Partenariats et relations internationales Partnerships and international relationships	147
	Focus : L'Infrastructure de de Recherche nationale OZCAR : Observatoires de la zone critique, applications et recherches The national research infrastructure OZCAR – Critical Zone Observatories, Applications and Research	150
	Observatoires, thèmes, plateformes et équipes de recherche Observatories, themes, platforms and research teams	156
	Direction, instances et référents Management, bodies and officers	160
	Budget	161
	Effectifs Staff	162



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 of Directors



A l'heure où l'intérêt de la science et de l'enseignement scientifique semble de plus en plus questionné par certains, ce rapport 2024 montre comment les personnels et étudiants de l'IPGP partagent un même enthousiasme pour les sciences de la Terre, de l'environnement et des planètes. Nos activités scientifiques jouent un rôle clef pour la société autour de nos trois missions premières à savoir : produire des connaissances fondamentales et appliquées, former les générations de demain, et assurer une surveillance de plus en plus efficace des aléas telluriques. En 2024 les enseignants-chercheurs, chercheurs, doctorants et post-doctorants, ingénieurs, de l'IPGP se sont distingués par de nombreux résultats scientifiques très originaux publiés dans les meilleures revues de nos disciplines, des distinctions prestigieuses et des réussites aux appels d'offres nationaux et européens, confirmant ainsi le rang de l'Institut parmi les tout premiers établissements mondiaux en Géosciences.

Une de ces réussites est la sélection de la mission NanoMagSat comme mission Scout du programme d'observation de la Terre de l'agence spatiale européenne (ESA). Cette sélection est l'aboutissement d'efforts initiés il y a tout juste 10 ans et capitalise sur les réalisations passées de l'IPGP, le magnétisme spatial ayant été à l'origine de la création en 1985 du département d'études spatiales de l'IPGP. NanoMagSat étudiera la dynamique du champ magnétique terrestre et de l'environnement ionosphérique de la terre, ouvrant la voie à toutes sortes d'applications que ce soit dans l'étude de la dynamique

At a time when the value of science and science education seems to be increasingly questioned, this 2024 report shows how IPGP staff and students share the same enthusiasm for Earth, environmental and planetary sciences. Our scientific activities play a key role for society around our three primary missions: to produce fundamental and applied knowledge, to train tomorrow's generations, and to ensure increasingly effective monitoring of telluric hazards. In 2024, the IPGP's teacher-researchers, researchers, doctoral and post-doctoral students and engineers distinguished themselves with numerous highly original scientific results published in the best journals in our disciplines, prestigious awards and successes in national and European calls, confirming the Institute's rank among the world's leading institutions in Geosciences.

One of these successes was the selection of the NanoMagSat mission as a Scout mission for the European Space Agency's (ESA) Earth observation program. This selection is the culmination of efforts initiated just 10 years ago, and capitalizes on IPGP's past achievements, space magnetism having been at the origin of the creation of IPGP's Space Studies Department in 1985. NanoMagSat will study the dynamics of the Earth's magnetic field and ionospheric environment, paving the way for a wide range of applications including the study of rapid core dynamics,



rapide du noyau, la recherche de signatures possibles du changement climatique, et des développements vers la météo spatiale.

L'école doctorale STEP'UP, et en particulier sa composante Terre et Environnement (TE) portée par l'IPGP, confirme en 2024-2025 son attractivité et sa dynamique. Cette année, 28 doctorantes et doctorants débutent leur thèse à l'IPGP, dont 55 % de femmes. Et plus de 40 % d'étudiants internationaux, témoignant du rayonnement international de l'établissement. Avec une durée moyenne de thèse de 38 mois, STEP'UP se positionne parmi les écoles doctorales les plus performantes en termes d'encadrement et d'efficacité de formation à UPCité.

L'année 2024 a aussi éprouvé nos collègues en poste à l'Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise qui sont aussi en charge du réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte. Nos réseaux

the search for possible signatures of climate change, and developments in space weather.

The STEP'UP doctoral school, and in particular its Earth and Environment component at IPGP, confirmed its attractiveness and dynamism. This year, 28 doctoral students are starting their thesis at IPGP, 55% of them women and over 40% international students, testifying to the school's international reputation. With an average thesis duration of 38 months, STEP'UP is one of the best-performing doctoral schools in terms of supervision and training efficiency at UPCité.

The year 2024 also tested our colleagues at the Piton de la Fournaise Volcanological Observatory (OVPF), who are also in charge of Mayotte's volcanological and seismological monitoring network. Our instrumental networks were



Équipe de direction 2024 (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.

2024 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.



instrumentaux ont été durement impactés avec en janvier le cyclone Belal à la Réunion et en décembre le cyclone Chido qui a eu des effets dévastateurs à l'échelle de toute l'île de Mayotte. Grâce à la réactivité et l'efficacité de tous les personnels de l'OVPF, le réseau a pu être rétabli rapidement pour assurer l'essentiel des missions de surveillance.

Cette année, l'IPGP a également continué à renforcer ses collaborations internationales par la signature d'un accord-cadre avec l'Institut National de Géophysique et de Volcanologie (INGV) italien qui est très proche de l'IPGP par ses thématiques de recherche et, à l'évidence, par son rôle dans la surveillance volcanologique et sismique en Italie. De nombreuses collaborations de différents types ont existé par le passé, mais cet accord devrait permettre de passer à une vitesse supérieure avec notamment des co-encadrements de thèse et des projets communs. Le premier colloque scientifique IPGP-INGV se tiendra à Paris à l'automne 2025. D'autres actions ont aussi été entreprises pour établir d'autres collaborations de recherche au niveau européen grâce à UPCité et son réseau CircleU.

Nous saluons donc à travers ce rapport l'investissement de tous les personnels, (administratifs, techniques et scientifiques) et étudiants de l'IPGP dans la réussite de toutes nos activités et dans les projets qui se développent pour les années à venir.

severely impacted by cyclone Belal on Reunion Island in January, and cyclone Chido in December, which had devastating effects across the whole island of Mayotte. Thanks to the responsiveness and efficiency of all OVPF staff, the network was quickly re-established, enabling us to carry out most of our monitoring missions.

This year, IPGP also continued to strengthen its international collaborations with the signing of a framework agreement with the Italian National Institute of Geophysics and Volcanology (INGV), which is very close to IPGP in terms of its research themes and, obviously, its role in volcanological and seismic monitoring in Italy. Numerous collaborations of various types have existed in the past, but this agreement should enable us to move up a gear, with thesis co-supervision and joint projects in particular. The first IPGP-INGV scientific symposium will be held in Paris in autumn 2025. Other actions have also been undertaken to establish further research collaborations at the European level through UPCité and its CircleU network.

Through this report, we salute the investment of all IPGP staff (administrative, technical and scientific) and students in the success of all our activities and in the projects being developed for the years to come.



En chiffres In figures

En lisant ce rapport, vous apprendrez que...

In reading this report, you will learn that...



3 stations multiparamètres en forage ont été installées en 2024 sur les flancs de La Soufrière de Guadeloupe pour renforcer la surveillance du volcan. Elles enregistrent en continu sismicité, déformation, pression, température et chimie des fluides.

borehole multiparameter stations were installed in 2024 on the slopes of La Soufrière in Guadeloupe to enhance volcano monitoring. They continuously record seismicity, deformation, pressure, temperature, and fluid chemistry.



4,5 milliards d'années c'est peut-être l'âge réel des anneaux de Saturne, selon un mécanisme de "nettoyage" découvert par une équipe IPGP, remettant en cause l'hypothèse dominante d'une origine récente.

billion years could be the actual age of Saturn's rings, according to a "self-cleaning" mechanism discovered by an IPGP-led team, challenging the prevailing theory of a recent origin.



90,8 mètres de carottes volcaniques ont été extraites lors des forages pour les nouvelles stations multiparamètres de surveillance installées à la Soufrière de Guadeloupe, permettant d'étudier 600 ans d'histoire géologique du volcan.

meters of volcanic cores were extracted during the drilling for new multiparameter monitoring stations installed at La Soufrière of Guadeloupe, allowing scientists to study 600 years of the volcano's geological history.



1 mètre par seconde : vitesse estimée des courants océaniques profonds dans l'océan subglaciaire de Ganymède, simulés par l'IPGP pour mieux comprendre la dynamique des lunes potentiellement habitables.

meter per second is the estimated velocity of deep ocean currents in Ganymede's subsurface ocean, as simulated by IPGP to better understand potentially habitable icy moons.



3 nanosatellites de 34 kg formeront la constellation NanoMagSat, pilotée scientifiquement par l'IPGP, pour observer le champ magnétique terrestre et l'environnement ionosphérique à partir de 2027.

34-kg nanosatellites will make up the NanoMag-Sat constellation, led scientifically by IPGP, to observe Earth's magnetic field and ionospheric environment starting in 2027.



200 doctorants STEP'UP forment la relève de la recherche en géosciences et astrophysique. La moitié sont internationaux, un chiffre reflétant le rayonnement du programme de formation de l'IPGP et ses partenaires. STEP'UP PhD students represent the next generation of researchers in geosciences and astrophysics. Half of them are international, reflecting the global appeal of IPGP's graduate training programs.

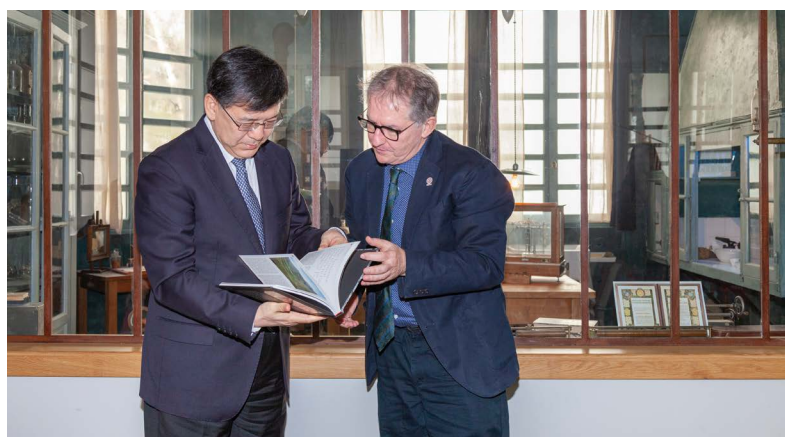


2,7 milliards d'années : ancienneté estimée des premières traces d'oxygène sur Terre, révélée par l'analyse isotopique de l'azote dans des sédiments brésiliens étudiés par une équipe de l'IPGP.

billion years is the estimated age of the earliest traces of oxygen on Earth, revealed by nitrogen isotope analysis of Brazilian sediments studied by an IPGP team.

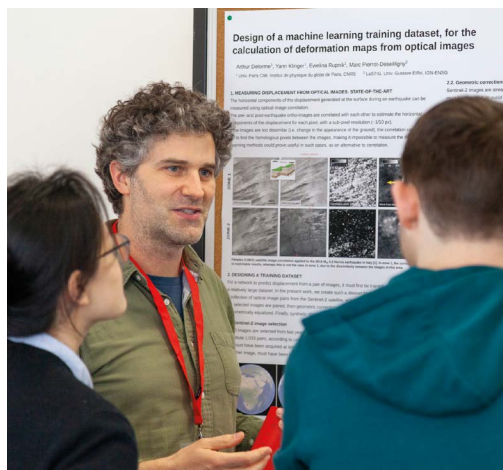
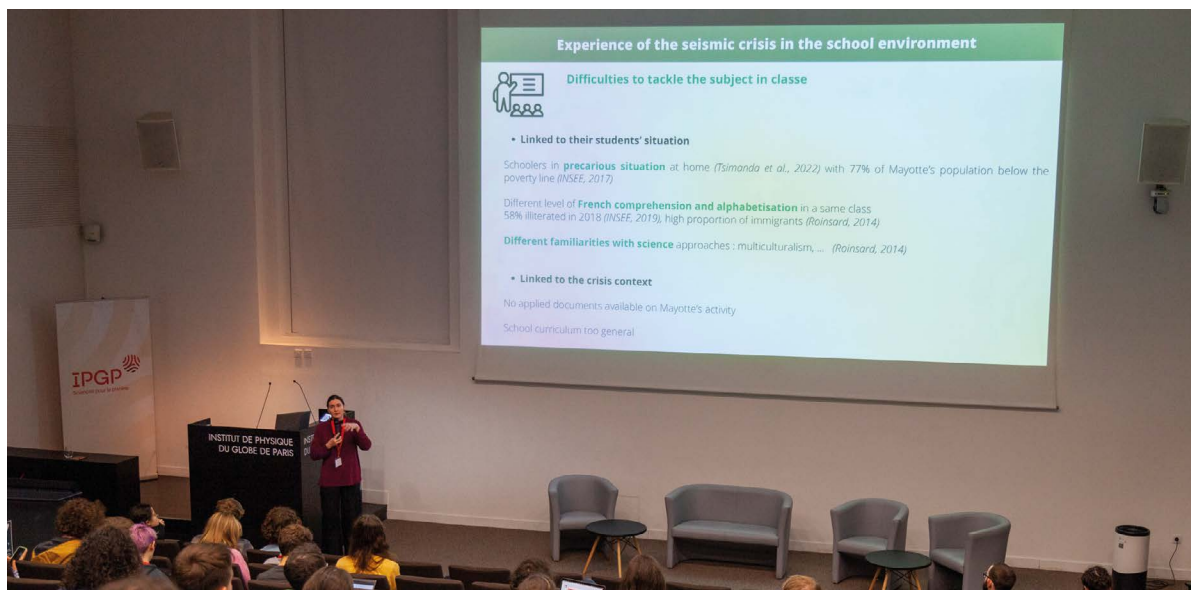


En images In pictures



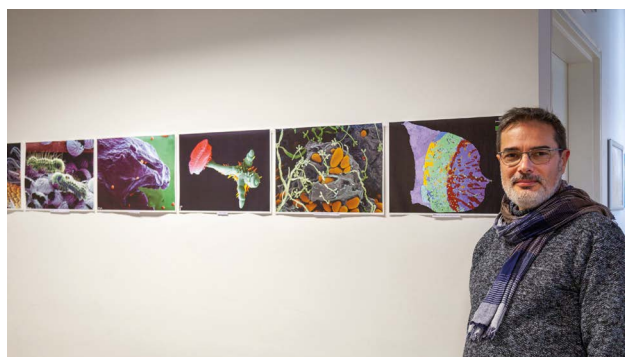
Réception de Monsieur Hejun Yin, Ministre de la Science et de la Technologie de la République populaire de Chine et de sa délégation, en visite en France à l'occasion du cinquième Comité mixte franco-chinois pour la science et la technologie.

Reception of Mr. Hejun Yin, Minister of Science and Technology of the People's Republic of China, and his delegation, visiting France on the occasion of the fifth Franco-Chinese Joint Committee on Science and Technology.



Congrès des doctorants 2024. La 31^e édition des Congrès des Doctorants organisé par les doctorants et doctorantes de première année de l'école doctorale Step'UP, s'est tenu du 26 au 29 mars 2024. Il avait pour thème « Communiquer les sciences de la Terre et de l'Univers à la société ».

PhD Students' Conference 2024. The 31st edition of the PhD Students' Conference, organized by first-year doctoral candidates from the Step'UP Doctoral School, was held from March 26 to 29, 2024. The theme was "Communicating Earth and Universe Sciences to Society".



Fête de la science. Du 3 au 5 octobre 2024, l'IPGP a ouvert ses portes aux groupes scolaires et au grand public partis à la découverte des sciences pour la planète. Une nouvelle édition couronnée de succès grâce à l'implication de l'ensemble des équipes.

Science Festival. From October 3 to 5, 2024, the IPGP opened its doors to school groups and the general public eager to explore the sciences for the planet. This new edition was a great success, thanks to the dedication of all the teams involved.





Fête des personnels. L'IPGP a participé à la fête des personnels de l'Université Paris Cité le 5 juillet 2024. Un moment de convivialité et de partage organisé sur le campus des Grands Moulins.

Staff Celebration. The IPGP took part in the Staff Celebration of Université Paris Cité on July 5, 2024. It was a warm and friendly gathering held on the Grands Moulins campus.



The "Earth & Planets Origin & Evolution" (EPOE) conference, held in May 2024 with the support of the Cosmochemistry, Astrophysics and Experimental Geophysics (CAGE) team and the European Research Council (ERC). More than 250 international participants had the opportunity to share their research findings in the majestic setting of the Verniquet amphitheater, located in the heart of the Jardin des Plantes.



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

Interview with Édouard Kaminski,
President of Université Paris Cité

L'Institut de physique du globe de Paris incarne pleinement la signature de l'Université Paris Cité : la « santé planétaire » : des êtres humains en bonne santé, au sein de sociétés en bonne santé, sur une planète en bonne santé.

L'année 2024 a été marquée pour l'Université Paris Cité par l'installation de cette signature. Elle marque la volonté de notre établissement de démontrer son impact positif sur la société, à travers les avancées de la recherche et de ses applications, la qualité de ses formations et leur internationalisation, et plus largement son impact socio-économique. L'Institut de physique du globe de Paris est un élément essentiel de cette signature. Non seulement parce qu'à lui seul l'IPGP incarne la dimension planétaire, par son sujet d'étude comme par son rayonnement international, mais également parce qu'il est emblématique de la manière dont une recherche fondamentale d'excellence peut être mise au service de la société.

Des sociétés en bonne santé ce sont des sociétés résilientes, vis-à-vis des changements climatiques et environnementaux, de la transition énergétique, ou encore des risques naturels. L'IPGP a été en 2024 présent sur l'ensemble de ce spectre : nouvelle ERC sur les processus de rupture sismique, nouvelle imagerie de la plomberie magmatique de la Soufrière de Guadeloupe, nouvelle analyse de la dynamique des aérosols en milieu tropical, ou encore nouvelle chaire industrielle sur l'exploration de l'hydrogène continental, pour ne citer que quelques exemples.

Mais des sociétés en bonne santé ce sont également des sociétés qui restent guidées par la recherche la plus fondamentale, par les développements

The Institut de physique du globe de Paris fully embodies the signature theme of Université Paris Cité : “planetary health” – healthy people, within healthy societies, on a healthy planet.

The year 2024 was marked for Université Paris Cité by the introduction of this signature. It signifies our institution's desire to demonstrate its positive impact on society. This signature reflects our institution's commitment to demonstrating its positive impact on society—through research breakthroughs and their applications, the quality and internationalization of its education, and, more broadly, its socio-economic influence. The Institut de physique du globe de Paris (IPGP) is a cornerstone of this signature. Not only because the IPGP, by its very nature, embodies the planetary dimension—both in its subject of study and international reach—but also because it exemplifies how world-class fundamental research can serve society.

Healthy societies are resilient societies—resilient to climate and environmental change, the energy transition, and natural hazards. In 2024, the IPGP was active across this entire spectrum : a new ERC grant on seismic rupture processes, novel imaging of the magmatic plumbing system of La Soufrière in Guadeloupe, new analysis of aerosol dynamics in tropical environments, and an industrial chair on continental hydrogen exploration, to name just a few examples.



de l'exploration spatiale et par l'amélioration de la compréhension de l'origine et fonctionnement des planètes, de la Terre au premier chef. Sur ces aspects l'IPGP a su maintenir ses points forts et renouveler les méthodologies et techniques de façon à rester l'établissement de référence pour les géosciences en France et en Europe, et un des meilleurs au niveau mondial, comme le souligne le classement thématique de Shanghai – notamment le score obtenu pour ses publications (3^e meilleur « world-class output » mondial), ou la sélection de l'IPGP pour l'analyse des futurs échantillons lunaires des missions Chang'e.

Combinées à la montée en puissance de la notoriété globale de l'Université Paris Cité, les performances scientifiques de l'IPGP lui permettent de maintenir son attractivité, pour les chercheurs comme pour les étudiants. Comme en témoigne le succès des nouvelles formations proposées par l'établissement, en particulier CPES et « PoITerre » qui ont diplômé en 2024 leur première cohorte, l'IPGP a vocation demain plus encore qu'aujourd'hui à valoriser ses fondamentaux disciplinaires dans le cadre d'approches interdisciplinaires au sein de l'Université Paris Cité et de son écosystème. Ce sont certains des jalons remarquables de cette trajectoire ambitieuse que permet de (re)découvrir ce rapport d'activité.

But healthy societies are also those guided by the most fundamental research, by advances in space exploration, and by a deeper understanding of the origin and functioning of planets—first and foremost, the Earth. In these areas, the IPGP has maintained its strengths while renewing methodologies and techniques, ensuring its continued status as the leading geoscience institution in France and Europe, and one of the very best in the world. This is reflected in the Shanghai subject ranking—particularly the third-highest global score for “world-class output”—and in the IPGP's selection to analyze future lunar samples from the Chang'e missions.

Combined with the growing global recognition of Université Paris Cité, the scientific achievements of the IPGP continue to drive its attractiveness to both researchers and students. This is evident in the success of the new academic programs launched by the institute—particularly CPES and “PoITerre”, which graduated their first cohorts in 2024. More than ever, the IPGP is poised to leverage its disciplinary foundations within interdisciplinary approaches across Université Paris Cité and its ecosystem. This activity report offers an opportunity to (re)discover some of the key milestones along this ambitious path.



Nouveaux projets de recherche

New Research Projects



Projets européens

EU projects

MohoLAB



Un projet de l'ERC pour sonder les fondations de la planète Terre

Le professeur Satish Singh (IPG Paris) a reçu une prestigieuse bourse ERC Advanced Grant pour son projet MohoLAB, qui s'attaque à l'un des grands défis des géosciences : comprendre l'origine et l'évolution de deux grandes frontières internes de notre planète – le Moho et le LAB – en utilisant une technologie sismique de pointe.

La discontinuité de Mohorovičić (Moho), la limite croûte-manteau, sépare la croûte terrestre du manteau sous-jacent. Il s'agit d'une manifestation claire de la différenciation chimique sur Terre, représentant le passage de roches légères riches en silice dans la croûte aux roches ultramafiques denses présentes dans le manteau. D'autre part, la limite lithosphère-asthénosphère (LAB) est une frontière rhéologique entre la lithosphère rigide flottante formant les plaques tectoniques et l'asthénosphère ductile, déformable et convective située en dessous (Fig. 1). Ces deux frontières prennent naissance aux

An ERC project to probe the foundations of planet Earth

Professor Satish Singh (IPG Paris) has been awarded a prestigious ERC Advanced Grant for his project MohoLAB, which tackles one of the great challenges in geosciences : understanding the origin and evolution of two major internal boundaries of our planet – the Moho and the LAB – using state-of-the-art seismic technology.

The Mohorovičić discontinuity (Moho), the crust-mantle boundary, separates the Earth's crust from the underlying mantle. It is a clear manifestation of the chemical differentiation on Earth, representing the change from light silica-rich rocks in the crust to dense ultramafic rocks in the mantle. On the other hand, the Lithosphere-Asthenosphere Boundary (LAB) is a rheological boundary between the floating rigid lithosphere forming the tectonic plates and the weak, deformable, and convecting asthenosphere underneath (Fig. 1). These two boundaries

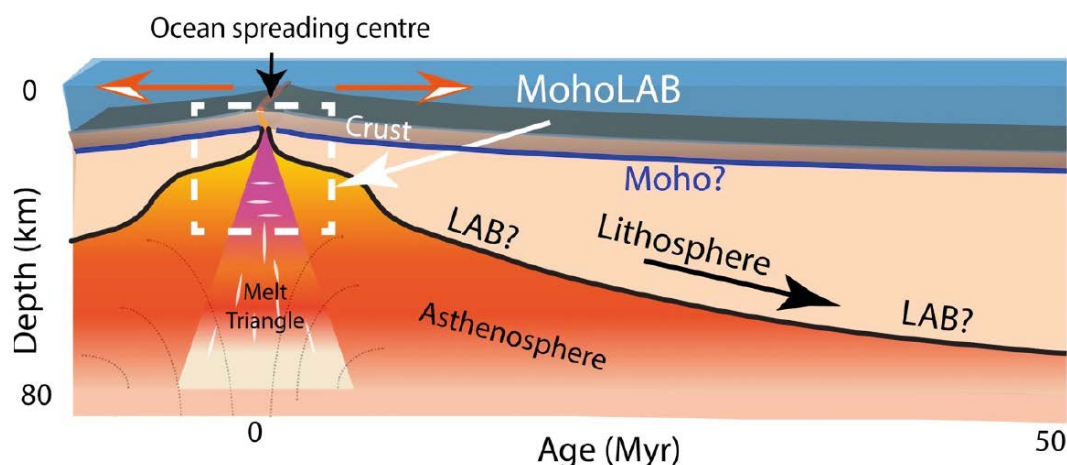


Schéma montrant la formation de la croûte, du Moho et de la lithosphère aux centres d'expansion océanique. La fusion se produit dans le triangle de fusion puis le magma migre vers la surface pour former la croûte océanique. Le carré en pointillés blancs indique la zone d'étude du projet MohoLAB.

Schematic diagram showing formation of the crust, Moho and lithosphere at ocean spreading centres. The melting occurs in the melt triangle and the melt migrates to the surface to form the ocean crust. The white dashed box indicates the focus of the MohoLAB project.



centres d'expansion océanique, où se forment les deux tiers de la croûte terrestre et de la lithosphère (Fig. 1). Le Moho (frontière chimique) et le LAB (frontière physique) servent à la fois de lieu de couplage et d'échange entre le manteau peu profond et le manteau profond, et représentent le caractère unique de la planète Terre au sein du système solaire. Cependant, la formation de ces frontières et leur évolution au cours de la première partie de leur existence restent une énigme. L'objectif du projet MohoLAB est de déterminer les propriétés sismiques de ces limites et des structures qui les entourent et de combiner ces résultats avec la technique de modélisation pétrologique et géodynamique afin de développer un modèle complet de leur formation et de leur évolution.

L'expérience doit se dérouler sur la zone du segment 9° N du centre d'expansion rapide East Pacific Rise en utilisant une technique de pointe de l'industrie, les nodes de fond de mer (OBN). Ces nodes sont des sismomètres de fond de mer, légers et compacts, basés sur une technologie MEM qui permet l'enregistrement de données à quatre composantes (pression et trois accélérations) (Fig. 2). Ils seront déployés sur le fond de mer avec un espacement d'environ 200 m à l'aide de deux ROV opérés en tandem, embarqués à bord d'un navire océanographique équipé d'une large source d'énergie pour pénétration profonde et d'une flûte marine de 12 km de long pour enregistrer les données classiques de sismique réflexion. La longueur des profils sismiques sera de 100 à 350 km, couvrant la zone du centre d'expansion et la lithosphère récente (0-5 Ma) et permettant ainsi d'obtenir des données de sismique réflexion et réfraction intégrées avec un petit espacement source-récepteur.

are first born at ocean spreading centres, where two-thirds of the earth crust and lithosphere are formed (Fig. 1). The Moho (chemical boundary) and LAB (physical boundary) together serve as the location where coupling and exchange take place between the shallow and deep mantle and are what makes the Earth a unique planet within the solar system. However, how these boundaries are originally formed and how they evolve during the early part of their existence remain a conundrum. The objective of the MohoLAB project is to determine the seismic properties of these boundaries and the structures around them and combine these results with petrology and geodynamical modelling to develop a comprehensive model for their formation and evolution.

The experiment is expected to take place at the 9° N segment of the fast-spreading East Pacific Rise using the most advanced industry technology, smart Ocean Bottom Nodes (OBNs). OBNs are small, lightweight, and compact Ocean Bottom Seismometers (OBSs), based on a MEM technology that can record four component data (pressure and three accelerations) (Fig. 2). They will be deployed on the seafloor at ~ 200 m spacing, efficient using dual Remotely Operated Vehicles (ROV) in tandem, aboard a dedicated seismic vessel, which will also carry a large energy source for deep penetration and a 12-km long streamer to record conventional seismic reflection data.



Figure 2. Node de fond de mer. Ocean bottom node.



Ces données seront analysées par des techniques avancées, telles que l'inversion de forme d'onde complète, pour déterminer les vitesses d'onde de compression (P) et de cisaillement (S) de la subsurface avec une résolution inégalée (200-500 m) jusqu'à 30 km de profondeur. La vitesse des ondes S étant très sensible à la présence de fluides, ces résultats seront particulièrement utiles pour imager les corps magmatiques.

A l'aide de ces résultats, nous espérons apporter une meilleure connaissance de la nature de la lentille de magma axiale (AML) sous les centres d'expansion, la présence de filons-couches dans la croûte inférieure et leur procédé de refroidissement pour former la croûte océanique inférieure (Fig. 3). Nous devrions également pouvoir dire comment le Moho passe de l'état de fusion à l'état normal. Comme la AML est sur le haut du LAB sous le centre d'expansion, nous devrions pouvoir suivre le LAB lorsqu'il traverse le Moho et pénètre plus profondément dans le manteau. S'il y a des lentilles de magma dans le manteau sous la lithosphère, nous devrions pouvoir les imager également, et donc proposer des informations plus complètes sur la migration du magma, l'accrétion crustale et l'évolution de la lithosphère.

Projet ERC Advanced Grant porté par Satish Singh de l'équipe Géosciences marines.

The length of seismic profiles will be 100 - 350 km, covering the spreading centre and young (0-5 Ma) lithosphere, allowing to obtain integrated seismic reflection and refraction at a very fine source-receiver spacing. These data will be subjected to advanced analysis methods, such as seismic full waveform inversion, to determine compressional (P) and shear

Using these results, we hope to provide insight about the nature of axial melt lens (AML) below the spreading centres, on the presence melt sills in the lower crust and how they cool to form the lower oceanic crustal layer (Fig.3). We should also be able to say how the molten Moho transitions to normal Moho. As the AML is the top of the LAB beneath the spreading centre, we should be able to follow the LAB as it crosses the Moho and deepens in the mantle. If there are melt lenses in the mantle beneath lithosphere, we should be able to image them as well, hence providing a complete information about melt migration, crustal accretion and lithospheric evolution.

ERC Advanced Grant project led by Satish Singh from the Marine Geosciences team.

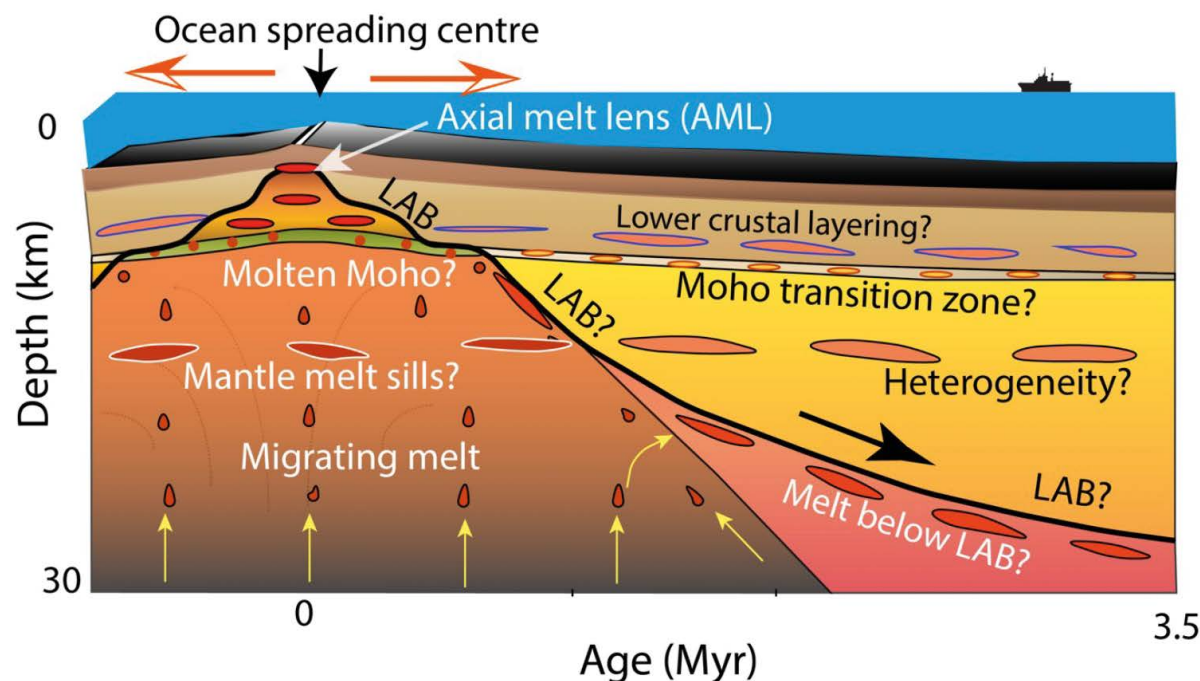


Schéma montrant les différents aspects du projet MohoLAB.

Schematic diagram showing different targets of the MohoLAB project.



BE-FACT



Boxing Earthquakes and Faults in Active Tectonics : une plongée en 3D au cœur des ruptures sismiques

Porté par Yann Klinger, directeur de recherche CNRS au sein de l'équipe *Tectonique et Mécanique de la Lithosphère* de l'IPGP, le projet BE-FACT a été récompensé en 2024 par un ERC Advanced Grant. Il vise à lever les verrous scientifiques qui limitent encore notre compréhension fine des processus de rupture lors des grands séismes.

Les séismes de forte magnitude concentrent l'essentiel de la déformation tectonique le long des failles actives. Cependant, malgré les nombreuses données acquises à chaque nouvel événement, les liens complexes entre la propagation des ruptures, la distribution du glissement et la géométrie des failles – et surtout leur évolution au fil des cycles sismiques – restent mal compris. Ce manque de connaissances constitue un frein majeur à l'amélioration de la modélisation du risque sismique.

Alors que les observations convergent vers un rôle clé de la géométrie des failles dans le contrôle de la rupture sismique, la caractérisation fine de cette géométrie en 3D reste difficile à établir à partir des seules données naturelles.

BE-FACT propose une approche inédite pour surmonter ces limites : générer des *séismes expérimentaux* en combinant expériences de laboratoire et modélisation numérique. Ces expériences permettront d'observer en détail, et dans un cadre entièrement maîtrisé, l'évolution tridimensionnelle des failles pendant la rupture.

Les données obtenues seront ensuite utilisées pour entraîner des réseaux neuronaux conçus pour inverser les paramètres de la source sismique, incluant la géométrie 3D de la rupture et la distribution du glissement. À terme, ces outils d'intelligence artificielle seront appliqués à des séismes réels,

Boxing Earthquakes and Faults in Active Tectonics : A 3D Dive into Earthquake Ruptures

Led by Yann Klinger, CNRS research director within the *Tectonics and Mechanics of the Lithosphere* team at IPGP, the BE-FACT project was awarded a prestigious ERC Advanced Grant in 2024. It aims to address long-standing scientific challenges in our understanding of earthquake rupture processes.

Large-magnitude earthquakes accommodate most of the Earth's tectonic deformation along active fault systems. Yet, despite an ever-growing volume of observations collected after each seismic event, the intricate relationships between rupture propagation, slip distribution, fault geometry, and its evolution through successive seismic cycles remain poorly understood. This lack of insight significantly limits progress in seismic hazard assessment.

While mounting evidence points to the critical role of fault geometry and its evolution in controlling rupture behavior, characterizing this geometry in three dimensions from natural data alone remains highly challenging and often inconclusive.

BE-FACT proposes a novel strategy to overcome this barrier : generating experimental earthquakes through a combination of laboratory experiments and numerical simulations. These experiments offer a fully controlled environment to observe in real time the dynamic evolution of fault systems in 3D during rupture.

The resulting datasets will then be used to train neural networks designed to resolve seismic source parameters, including 3D rupture geometry and finite slip distribution. Ultimately, these AI tools will be applied to real earthquakes

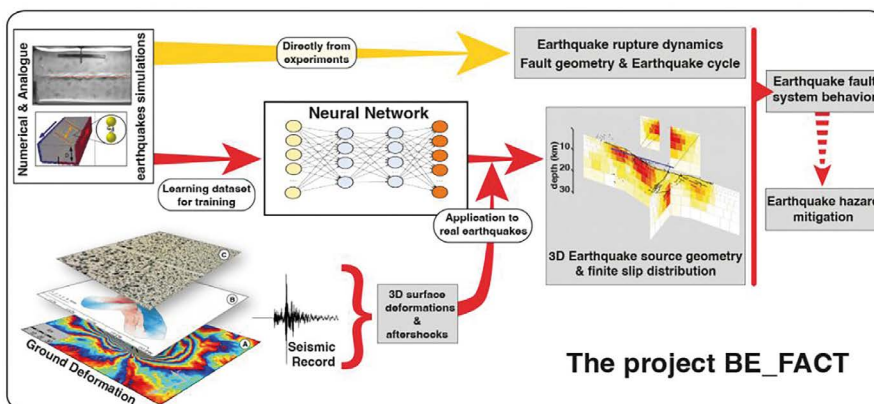


Schéma descriptif du projet
Descriptive diagram of the project



en intégrant des données de terrain, de télédétection, et de sismologie, afin de produire des modèles 3D complets et robustes des ruptures.

En associant innovation expérimentale, modélisation avancée et intelligence artificielle, le projet BE-FACT entend fournir une vision intégrée et dynamique des systèmes de failles sismiques, contribuant à mieux anticiper les effets des grands séismes et à renforcer la résilience des sociétés exposées.

Projet ERC Advanced Grant porté par Yann Klinger, directeur de recherche CNRS au sein de l'équipe Tectonique et Mécanique de la Lithosphère.

by integrating remote sensing, field, and seismic data to produce robust 3D rupture models.

By combining experimental innovation, advanced modeling, and artificial intelligence, BE-FACT aims to deliver an integrated and dynamic vision of active fault systems—shedding new light on the physical mechanisms that govern seismic ruptures and contributing to improved earthquake resilience.

ERC Advanced Grant project led by Yann Klinger, CNRS research director within the Tectonics and Mechanics of the Lithosphere team.

TRANSFORM²



TRANSFORM² : Un tournant dans l'étude des failles sismiques en Europe

Sous la direction scientifique de Pascal Bernard, au sein de l'IPGP, le projet TRANSFORM² (TowaRds AdvaNced multi-diSciplinary Fault ObseRvatory systeMs²) vise à faire progresser l'étude des failles géologiques actives en Europe. Ce projet ambitieux, coordonné par l'Université de Patras en Grèce, est soutenu par un financement de 3 millions d'euros de la Commission Européenne dans le cadre de l'appel à projets Horizon Europe INFRADEV 2024.

L'objectif de TRANSFORM² est de moderniser les Natural Fault Observatories (NFO), des sites uniques dédiés à la surveillance des phénomènes sismiques. Ce projet scientifique de pointe intégrera des technologies innovantes telles que des capteurs de nouvelle génération, des systèmes de détection automatique, ainsi que des plateformes d'alerte précoce. L'utilisation de l'intelligence artificielle et des capteurs à fibre optique permettra de recueillir des données d'une précision inédite, offrant ainsi une meilleure compréhension des processus sismiques et une réponse plus rapide face aux risques sismiques.

Le projet, d'une durée de 36 mois, vise à renforcer la sécurité des populations européennes tout en ouvrant de nouvelles voies pour la recherche fondamentale en sismologie. Grâce à ce financement, TRANSFORM², offre à l'IPGP l'opportunité de contribuer de manière significative à cette avancée scientifique, qui transformera les pratiques de l'observation sismique en Europe.

Projet lauréat du programme Horizon Europe porté par Pascal Bernard

TRANSFORM²: A Turning Point in the Study of Seismic Faults in Europe

Under the scientific leadership of Pascal Bernard at IPGP, the TRANSFORM² project (TowaRds AdvaNced multi-diSciplinary Fault ObseRvatory systeMs²) aims to advance the study of active geological faults across Europe. This ambitious project, coordinated by the University of Patras in Greece, is supported by €3 million in funding from the European Commission as part of the Horizon Europe INFRADEV 2024 call for projects.

The objective of TRANSFORM² is to modernize Natural Fault Observatories (NFOs), unique sites dedicated to monitoring seismic phenomena. This cutting-edge scientific initiative will integrate innovative technologies such as next-generation sensors, automatic detection systems, and early warning platforms. The use of artificial intelligence and fiber optic sensors will enable the collection of unprecedentedly precise data, offering a deeper understanding of seismic processes and a faster response to seismic risks.

The 36-month project aims to enhance the safety of European populations while opening new avenues for fundamental research in seismology.

Thanks to this funding, TRANSFORM² offers IPGP the opportunity to make a significant contribution to this scientific breakthrough, which will transform seismic observation practices across Europe.

Award-winning project under the Horizon Europe programme led by Pascal Bernard



HCont


 Université
Paris Cité


Lancement d'une deuxième chaire industrielle dédiée à l'exploration de l'Hydrogène Continental (HCont)

Une deuxième chaire industrielle sur l'« exploration de l'Hydrogène Continental » (HCont), portée par Isabelle Martinez, professeure dans l'équipe de Géochimie des isotopes stables (GIS), en collaboration avec l'équipe Lithosphère Organosphère Microbiosphère (LOMs), a été créée en 2024 autour de la thématique de l'hydrogène naturel, qui pourrait devenir une source d'énergie décarbonée dans le futur mix énergétique. Cette chaire a deux objectifs principaux :

- l'identification et la caractérisation des mécanismes encore mal connus de genèse de l' H_2 naturel,
- le développement de nouveaux traceurs géochimiques et géo-microbiologiques pour cibler des sites potentiels en vue de l'exploitation et/ou du stockage d' H_2 naturel.

Des premiers travaux de recherche avec l'industrie ont été conduits en 2024 en collaboration avec SLB (Schlumberger). La chaire développe actuellement d'autres liens industriels.

Chaire industrielle portée par Isabelle Martinez, professeure dans l'équipe de Géochimie des isotopes stables (GIS).

Projet FIRE UP de l'Université Paris Cité

Launch of a second industrial chair dedicated to the exploration of continental hydrogen (HCont)

A second industrial chair on the "exploration of continental hydrogen" (HCont), led by Isabelle Martinez, professor in the stable isotope geochemistry (GIS) team, in collaboration with the lithosphere-organosphere-microsphere (LOMs) team, was established in 2024 around the theme of natural hydrogen, which could become a source of decarbonized energy in the future energy mix.

This chair has two main objectives :

- the identification and characterization of the still poorly understood mechanisms of natural H_2 generation,
- the development of new geochemical and geo-microbiological tracers to target potential sites for the exploration and/or storage of natural H_2 .

Initial research work with industry was conducted in 2024 in collaboration with SLB (Schlumberger). The chair is currently developing additional industrial partnerships.

Industrial Chair led by Isabelle Martinez, professor in the Stable Isotope Geochemistry (GIS) team.

FIRE UP project by Université Paris Cité



Labex UnivEarthS

Labex UnivEarthS

L'année 2024 marque la fin du laboratoire d'excellence (labex) UnivEarthS qui a été sélectionné en 2011 dans le cadre du programme des investissements d'avenir avec un financement d'environ 1 M€/an, et a été prolongé en 2019 pour une nouvelle période de 5 ans avec un financement légèrement inférieur de 0,9 M€/an.

Le Laboratoire d'Excellence UnivEarthS a été un programme de recherche dédié au développement de projets interdisciplinaires dans les domaines des sciences de la Terre et de la physique de l'Univers. Il a rassemblé les membres de l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP/UPCité/CNRS/IGN/URéunion), des laboratoires AstroParticule & Cosmologie (APC, UPCité/CNRS/CEA/Observatoire de Paris) et Astrophysique, Instrumentation, Modélisation (AIM, CEA/CNRS/UPCité), et de l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA).

La construction de ce programme reposait sur la constatation que les géosciences, l'astrophysique et les sciences spatiales partageaient une culture scientifique commune en ce qui concerne les objets étudiés, les questions abordées, les méthodes développées et les défis technologiques correspondants.

Ce programme a été particulièrement dynamique et fructueux scientifiquement avec un certain nombre de projets interdisciplinaires pour l'IPGP dont trois sont assez emblématiques.

L'utilisation de télescopes à muons en conjonction avec d'autres mesures de conductivité électrique et de gravité a permis d'utiliser les muons cosmiques pour tomographier l'intérieur de la Soufrière de Guadeloupe et révéler la structure de la partie du volcan (en particulier des vides ou des zones de faible porosité indétectables autrement) où le système hydrothermal est très actif.

2024 marks the end of the Laboratory of Excellence (Labex) UnivEarthS, which was selected in 2011 as part of the French "Investissements d'Avenir" program, with funding of approximately €1 million per year. It was extended in 2019 for a further five-year period with slightly reduced funding of €0.9 million per year.

The UnivEarthS Laboratory of Excellence was a research program dedicated to developing interdisciplinary projects in the fields of Earth sciences and astrophysics. It brought together members from the Institut de physique du globe de Paris (IPGP/UPCité/CNRS/IGN/URéunion), the AstroParticle & Cosmology Laboratory (APC, UPCité/CNRS/CEA/Observatoire de Paris), the Astrophysics, Instrumentation, and Modeling Laboratory (AIM, CEA/CNRS/UPCité), and the French Aerospace Research Agency (ONERA).

The program was built on the recognition that geosciences, astrophysics, and space sciences share a common scientific culture regarding the objects studied, the questions addressed, the methods developed, and the associated technological challenges.

This program proved to be particularly dynamic and scientifically fruitful, with a number of interdisciplinary projects at IPGP, three of which are particularly emblematic.

The use of muon telescopes, in combination with other electrical conductivity and gravity measurements, allowed cosmic muons to be used for tomography of the Soufrière volcano in Guadeloupe. This revealed the structure of parts of the volcano—particularly voids or zones of low porosity that would otherwise be undetectable—where the hydrothermal system is highly active.



La détection lors du tremblement de Terre de Tohoku (magnitude 9.0) d'un signal de gravité se propageant à la vitesse de la lumière a ouvert la voie pour progresser dans l'alerte avancée aux grands tremblements de Terre en développant des détecteurs de signaux de gravité produits par les tremblements de Terre.

Enfin la détection des géo-neutrinos (produits par la radioactivité dans le manteau terrestre) par les détecteurs à neutrinos installés dans les profondeurs de la Méditerranée pour développer l'astronomie des neutrinos cosmiques, a fourni des informations uniques sur la composition chimique du manteau terrestre à grande profondeur.

L'organisation régulière d'ateliers communs et d'écoles entre astrophysiciens et géophysiciens a amené à la création de l'école doctorale STEP'UP (Sciences de la Terre, de l'environnement et des planètes et physique de l'univers de Paris) par la fusion des deux écoles doctorales précédentes portées par l'IPGP et par l'APC et AIM.

La création dans UPCité de la graduate school Earth-Planets-Universe a augmenté l'attractivité des formations en master pour la poursuite en doctorat, notamment envers les étudiants étrangers. STEP'UP compte plus de 200 doctorants dont la moitié sont étrangers.

L'intégration grâce au projet DANTE soutenu par la région Ile de France du centre de calcul François Arago de l'APC dans la plateforme SCAPAD de l'IPGP a été une autre étape du rapprochement entre géosciences et astrosciences.

The detection during the Tohoku earthquake (magnitude 9.0) of a gravity signal propagating at the speed of light opened the way toward improved early-warning systems for major earthquakes by developing detectors for gravity signals generated by seismic events.

Finally, the detection of geoneutrinos (produced by radioactivity within the Earth's mantle) by neutrino detectors installed deep in the Mediterranean Sea to develop cosmic neutrino astronomy provided unique insights into the chemical composition of the Earth's deep mantle.

The regular organization of joint workshops and schools between astrophysicists and geophysicists led to the creation of the STEP'UP doctoral school (Earth, Environment, Planetary Sciences and Physics of the Universe of Paris) through the merger of the two former doctoral schools run by IPGP and APC/AIM.

The creation of the Earth-Planets-Universe Graduate School within UPCité enhanced the attractiveness of master's programs as pathways to doctoral studies, particularly for international students. STEP'UP now has more than 200 PhD students, half of whom are international.

The integration, through the DANTE project supported by the Île-de-France Region, of the François Arago Computing Center (APC) into the SCAPAD platform (IPGP) marked another step toward strengthening ties between geosciences and astrosciences.



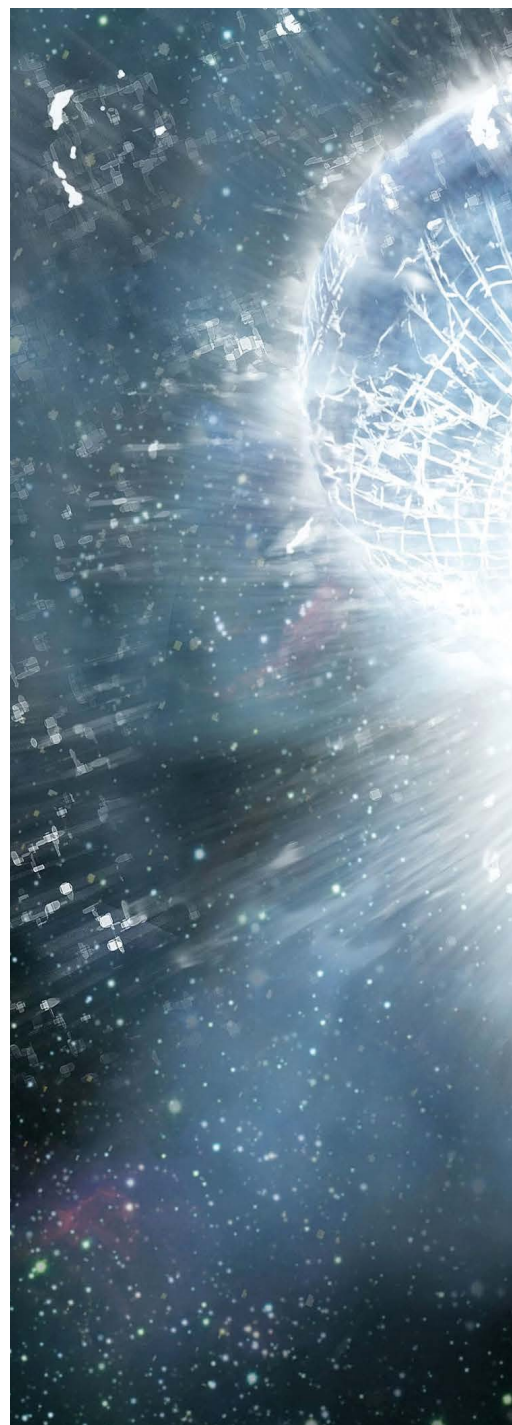


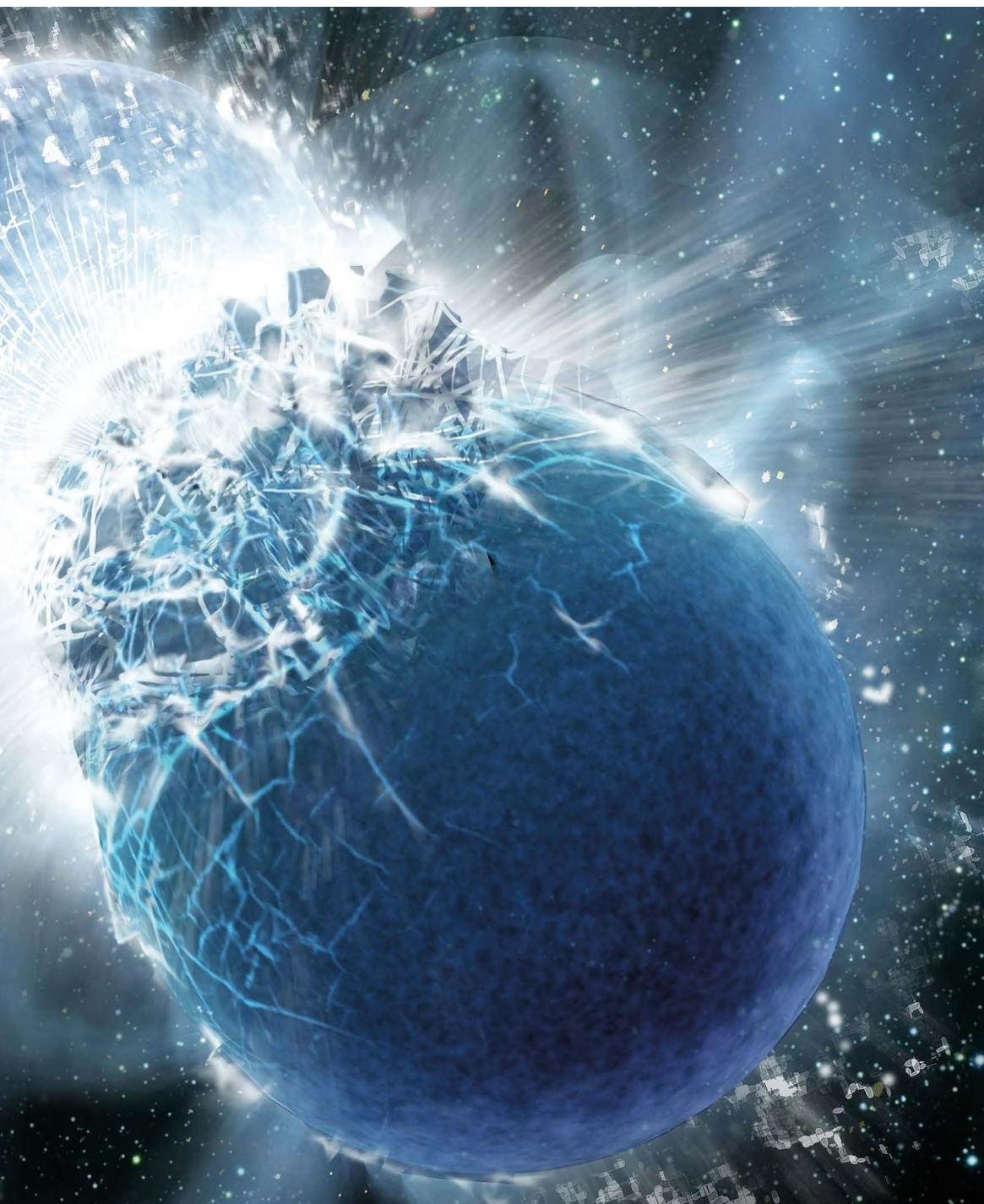
UnivEarthS a aussi eu un impact très important en formant les étudiants aux technologies et questions scientifiques du spatial avec le projet de nano-satellite étudiants IGOSat. Ce projet pédagogique ambitieux a accueilli depuis 2012 plus de 400 étudiants qui ont participé à toutes les étapes de l'élaboration du satellite et de ses deux instruments, l'un pour étudier le contenu électronique de l'ionosphère et l'autre pour détecter les électrons et les rayons gammas aux niveaux des pôles et de l'anomalie magnétique de l'Atlantique Sud. La livraison du modèle de vol est prévue pour septembre 2025.

La fin programmée en 2024 des labex, dont les dotations ont été intégrées avec celle de l'Idex UPCité a amené UPCité à élaborer une stratégie d'excellence (StratEx) et à lancer des appels d'offres pour de nouveaux projets qui prendront la suite des labex. Le projet HERMES qui rassemble cette communauté (IPGP, APC, AIM) et qui partage le développement d'approches observationnelles de plus en plus sophistiquées de la Terre et de l'Univers a été construit fin 2024 pour développer une approche multi-messagers pour répondre aux grandes questions liées à nos origines.

UnivEarthS also had a major impact by training students in space technologies and scientific challenges through the student nano-satellite project IGOSat. This ambitious educational project has involved over 400 students since 2012, who have contributed to all stages of the satellite's development and its two instruments : one to study the electron content of the ionosphere, and the other to detect electrons and gamma rays near the poles and the South Atlantic Magnetic Anomaly. Delivery of the flight model is scheduled for September 2025.

The scheduled end of the Labex programs in 2024, whose funding was merged into that of the UPCité Idex, led UPCité to develop an excellence strategy (StratEx) and launch calls for new projects to succeed the Labex initiatives. The HERMES project, built at the end of 2024, brings together this community (IPGP, APC, AIM) and aims to develop increasingly sophisticated observational approaches to Earth and the Universe, with a multi-messenger strategy to address major questions related to our origins.





Point final de la vie de couple stellaire de deux étoiles à neutrons qui entrent en collision et fusionnent. © Dana Berry/Skyworks Digital, Inc./The Kavli Foundation.

Final stage of the stellar life of a binary neutron star system, where the two stars collide and merge. Credits : Dana Berry/Skyworks Digital, Inc./The Kavli Foundation.

Contact : Marc Chaussidon | chaussidon@ipgp.fr





Nouveaux instruments

New instruments



L'IPGP renforce la surveillance volcanique à La Soufrière de Guadeloupe avec des stations en forage multi-paramètres innovantes

IPGP strengthens volcanic monitoring at La Soufrière de Guadeloupe with innovative borehole multi-parameter stations

L'île de Basse Terre en Guadeloupe est la partie immergée d'une succession de volcans dont le dernier, La Soufrière de Guadeloupe est apparue il y a environ 9150 ans. Il s'agit d'un volcan actif, de type explosif, ayant connu par le passé de nombreuses éruptions magmatiques et phréatiques.

La dernière éruption magmatique majeure, qui date du XVI^e siècle (1530 $\pm$ 30 ans ; Komorowski *et al.*, 2008) a conduit dans sa phase finale à la formation du dôme actuel.

Depuis, les éruptions qui se sont produites ont été uniquement phréatiques impliquant une décompression explosive du système hydrothermal et l'éjection de matériaux anciens du volcan sans apport de magma nouveau. Ces éruptions ont été majeures en 1797-98, 1836-37 et 1976-77 et mineures en 1690, 1809-1812, et 1956. Durant l'éruption de 1976-1977, environ 73000 personnes habitant sur les flancs du volcan et jusqu'à 13 km de distance, ont été déplacées durant une période de 3 mois à 6 mois (Komorowski *et al.*, 2025). Cet événement traumatisant pour beaucoup de personnes est encore bien présent dans les mémoires des habitants de Basse Terre et ses environs.

Après une période d'accalmie, l'activité fumerolienne a repris en 1992 et n'a cessé d'augmenter d'année en année. Depuis quelques années l'activité du volcan est caractérisée par une augmentation de la sismicité d'origine volcanique en essaim, un dégazage fumerollien au sommet qui augmente en intensité et en concentration pour les gaz soufrés (H₂S, SO₂) et le chlore (HCL), une anomalie thermique dans la zone sommitale au sol qui progresse, une augmentation notoire des températures des fumerolles (jusqu'à environ 200 °C) et une déformation du dôme de la Soufrière qui s'accélère sur la partie la plus haute de l'édifice. Si ces éléments témoignent d'une activité superficielle en augmentation notamment au niveau du système hydrothermal, ils n'indiquent pour l'instant pas de signe mettant en évidence une éventuelle remontée de magma vers la surface. Compte tenu de cette activité, le volcan est placé par les autorités au

The island of Basse-Terre in Guadeloupe is the submerged part of a succession of volcanoes, the last of which, La Soufrière de Guadeloupe, appeared approximately 9,150 years ago. It is an active volcano of the explosive type, having experienced numerous magmatic and phreatic eruptions in the past.

The last major magmatic eruption, dating back to the 16th century (1530 $\pm$ 30 years ; Komorowski *et al.*, 2008), led in its final phase to the formation of the current dome. Since then, the eruptions that have occurred have been solely phreatic, involving explosive decompression of the hydrothermal system and the ejection of old volcanic materials without the addition of new magma. These eruptions were major in 1797-98, 1836-37, and 1976-77, and minor in 1690, 1809-1812, and 1956. During the 1976-1977 eruption, approximately 73,000 people living on the volcano's flanks and up to 13 km away were displaced for a period of 3 to 6 months (Komorowski *et al.*, 2025). This event was traumatic for many and is still vividly remembered by the inhabitants of Basse-Terre and its surroundings.

After a period of calm, fumarolic activity resumed in 1992 and has been increasing year by year. In recent years, the volcano's activity has been characterized by an increase in volcanic seismicity in swarms, intensifying fumarolic degassing at the summit with higher concentrations of sulfur (H₂S, SO₂) and chlorine gases (HCL), a thermal anomaly in the summit area that is progressing, a notable increase in fumarole temperatures (up to approximately 200°C), and accelerating deformation of the Soufrière dome at its highest point. While these elements indicate increasing surface activity, particularly in the hydrothermal system, they do not currently suggest any signs of magma rising to the surface. Given this activity, the authorities have placed the volcano at the yellow alert level (Vigilance) of the ORSEC volcano plan of the Prefecture.



Installation du dispositif de descente du vecteur d'instruments en fond de puits sur le site IPGP de Parnasse à Saint Claude. Les deux bobines situées à hauteur d'homme servent à dérouler les tuyaux semi-rigide en acier inoxydable qui amèneront l'eau sous pression en fond de puits lors du retrait des instruments.

Installation of the deployment system for lowering the instrument carrier to the bottom of the borehole at the IPGP Parnasse site in Saint-Claude. The two reels positioned at human height are used to unwind the semi-rigid stainless steel pipes that will deliver pressurized water to the bottom of the borehole during instrument retrieval.

niveau d'alerte jaune (Vigilance) du plan ORSEC volcan de la Préfecture. De plus, le préfet a instauré depuis 2018 une réglementation de l'accès des zones fumeroliennes au sommet avec un protocole renforcé depuis 2023.

L'installation d'instruments dans le but de surveiller un volcan actif doit se faire en prenant en compte des contraintes particulières liées à la topographie du volcan, à l'accessibilité des sites, à la nécessité de maximiser le rapport signal sur bruit des enregistrements et de conserver le plus longtemps possible des instruments opérationnels lors de la réactivation du volcan notamment en cas d'éruption.

Placer des instruments en forage permet d'améliorer significativement le rapport signal sur bruit et offre une protection importante des instruments situés en profondeur face aux aléas naturels (séismes, cyclones, éruption volcanique) qui rendent l'accès impossible au personnel ou endommagent les instruments en surface. Ceux-ci ont vocation à enregistrer, en continu et en temps-réel, des signaux ténus qui reflètent des modifications rapides de processus pouvant aboutir soit à la pressurisation rapide du système (activité explosive) d'origine hydrothermale ou magmatique profonde, à la remontée rapide de poches de magma de faible volume, voire à une augmentation de l'instabilité mécanique des flancs de l'édifice qui pourrait culminer par un effondrement soudain de certaines zones de l'édifice.

Additionally, since 2018, the Prefect has instituted regulations for access to the fumarolic zones at the summit, with enhanced protocols since 2023.

The installation of instruments to monitor an active volcano must consider specific constraints related to the volcano's topography, site accessibility, the need to maximize the signal-to-noise ratio of recordings, and to keep instruments operational for as long as possible during volcanic reactivation, especially in the event of an eruption.

Placing instruments in boreholes significantly improves the signal-to-noise ratio and provides important protection for deep-seated instruments against natural hazards (earthquakes, cyclones, volcanic eruptions) that can make access impossible for personnel or damage the instruments. These instruments are designed to continuously record, in real-time, subtle signals that reflect rapid changes in processes that could lead to rapid pressurization of the system (explosive activity) of hydrothermal or deep magmatic origin, rapid ascent of small magma pockets, or increased mechanical instability of the volcano's flanks, potentially culminating in sudden collapse of certain areas of the edifice. These signals could be precursors to the volcanic



Ces signaux pourraient s'avérer être des précurseurs d'une évolution vers la criticité du système volcanique et l'occurrence de phénomènes soudains en surface.

Dans le contexte d'une augmentation croissante de l'activité volcanique non-éruptive, l'IPGP a réalisé avec le soutien financier du ministère de la transition écologique trois stations multi-paramètres en forages. Le but de cette instrumentation est d'observer les micro-séismes générés par l'activité hydrothermale sous le dôme de la Soufrière, les déformations liées à la réactivation du volcan et les variations de température et du niveau de la nappe phréatique.

La géométrie du réseau des stations permettra aux données d'inclinométrie et GNSS de quantifier le volume de matière déplacé avant l'arrivée de magma en surface. La récupération de carottes de roche lors de ces forages donne de précieux renseignements sur le fonctionnement du volcan durant les derniers 600 ans depuis l'éruption de 1530 de l'ère commune.

Structure et instruments des stations

Ces stations comprennent deux forages de profondeur différente : un forage de 10 m accueille un sismomètre large bande et un forage de 50 m de profondeur accueille les autres instruments. La réalisation des forages, confiée à la société Ginger, a demandé des moyens techniques acheminés depuis l'hexagone pour garantir la foration ainsi qu'une verticalité meilleure que 2 degrés dans des couches géologiques très indurées ou au contraire altérées tout en respectant les contraintes environnementales du parc naturel national de Guadeloupe.

Les deux inclinomètres de précision et de gamme de mesures différentes, la sonde de pression, la sonde de conductivité et la sonde de température sont rendus solidaires par un ensemble mécanique en acier inoxydable. En surface, la station est équipée d'un récepteur GNSS et d'une station météorologique complète. Une dalle de béton armé équipée de plots d'une sur-épaisseur de 50 cm ancrés dans le sol permet de stabiliser le trépied nécessaire à la mise en place des instruments dans les forages mais aussi à l'extraction de ces instruments en cas de panne. Il est prévu que les instruments restent des années avant d'être remontés, dans ces conditions il est probable que des adhérences se créent entre les capteurs, la mécanique qui les rends solidaires et les granulats d'oxyde d'aluminium (corindon) qui entourent le tout rendant l'extraction des instruments par simple arrachage difficile. Pour remédier à ce problème, la mécanique d'assemblage est munie de tuyères en acier inoxydable raccordées à la surface pour permettre d'injecter de l'eau

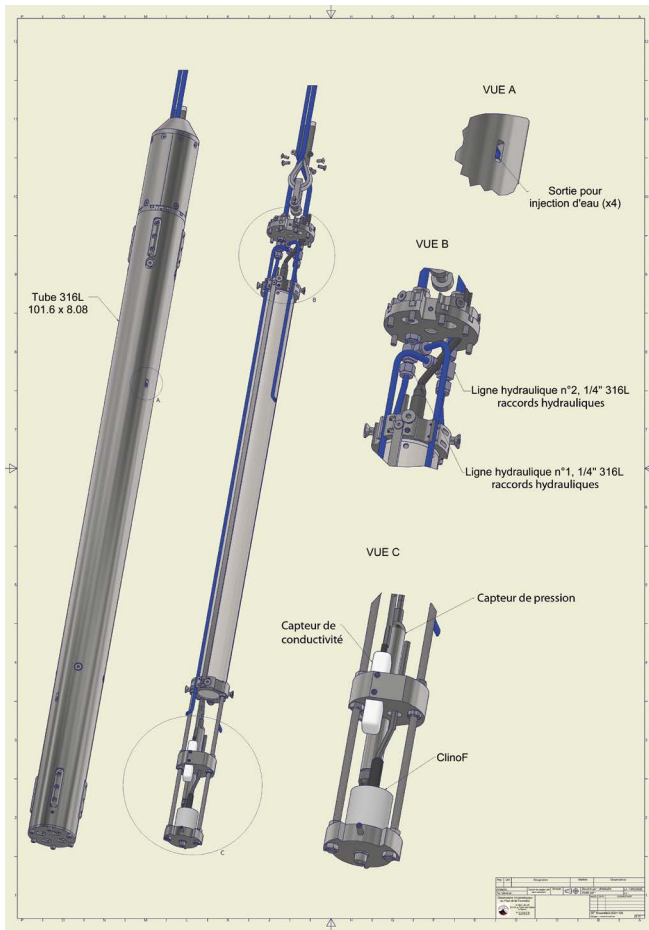
system's evolution towards criticality and the occurrence of sudden surface phenomena.

In the context of increasing non-eruptive volcanic activity, the IPGP, with financial support from the Ministry of Ecological Transition, has installed three multi-parameter borehole stations. The purpose of this instrumentation is to observe micro-seismicity generated by hydrothermal activity beneath the Soufrière dome, deformations related to volcanic reactivation, and variations in temperature and groundwater levels. The geometry of the station network will allow inclinometry data to quantify the volume of material displaced before magma reaches the surface. The recovery of rock cores during these boreholes provides valuable information about the volcano's functioning over the last 600 years since the 1530 eruption.

Structure and Instruments of the Stations

These stations include two boreholes of different depths : a 10-meter borehole houses a broadband seismometer, and a 50-meter borehole houses the other instruments. The drilling, carried out by the company Ginger, required technical means brought in from mainland France to ensure drilling and verticality better than 2 degrees in highly indurated or altered geological layers, while respecting the environmental constraints of the Guadeloupe National Natural Park.

The two precision inclinometers with different measurement ranges, the pressure probe, the conductivity probe, and the temperature probe are mechanically integrated using a stainless-steel assembly. On the surface, the station is equipped with a GNSS receiver and a complete weather station. A reinforced concrete slab with 50 cm thick anchored pads stabilizes the tripod needed for instrument placement in the boreholes and for instrument extraction in case of failure. The instruments are designed to remain in place for years before being retrieved. Under these conditions, adhesions may form between the sensors, the mechanical assembly, and the aluminum oxide (corundum) granules surrounding them, making simple extraction difficult. To address this issue, the mechanical assembly is equipped with stainless-steel nozzles connected to the surface, allowing water to be injected from the



Mécanique vecteur de l'instrumentation, développée à l'IPGP pour assembler les différents capteurs descendus au fond du forage. Vue A : gros plan sur une des sorties pour l'injection d'eau sous pression permettant de décoller l'ensemble en cas de retrait pour maintenance. Vue B : gros plan sur la tête du vecteur avec le raccordement des 4 sorties d'injection d'eau sur les lignes hydraulique d'alimentation. Vue C : gros plan sur le pied du vecteur avec les capteurs de température, conductivité, pression et l'inclinomètre MEMS à grande dynamique.

Mechanical vector of the instrumentation, developed at the IPGP to assemble the various sensors lowered to the bottom of the drilling. View A : Close-up of one of the outlets for the injection of pressurized water to detach the assembly in case of removal for maintenance. View B : Close-up of the vector head with the connection of the 4 water injection outlets to the hydraulic supply lines. View C : Close-up of the vector foot with temperature, conductivity, pressure sensors, and the high-dynamic MEMS inclinometer.

depuis la surface jusqu'au fond du puits avec une pression suffisante pour rompre les adhérences et permettre la remontée de l'ensemble par traction.

Les données issues de ces stations sont transmises en temps réel à l'observatoire par wifi ou 4G. Ces stations, autonomes en énergie sont alimentées par panneaux solaires. Les batteries ont été dimensionnées pour assurer 5 jours de fonctionnement en l'absence totale de lumière. En effet, lors d'une éruption volcanique, il est fréquent que les cendres émises couvrent la surface des panneaux solaires, il est ensuite nécessaire de nettoyer les panneaux solaires pour qu'ils fonctionnent à nouveau.

Une collaboration impliquant les 3 observatoires volcanologiques et sismologiques de l'IPGP et les services centraux de l'IPGP

Ce projet est un travail qui a réuni des collègues de l'IPGP à Paris, en Guadeloupe, en Martinique et à La Réunion. Les coffrets comprenant les modules d'acquisition des données, de protection contre la foudre et de communication ont été conçus puis réalisés à l'OVSF.

surface to the bottom of the well with sufficient pressure to break the adhesions and enable the extraction of the assembly by traction.

The data from these stations are transmitted in real-time to the observatory via WiFi or 4G. These energy-autonomous stations are powered by solar panels. The batteries are sized to ensure 5 days of operation in the absence of light. During a volcanic eruption, it is common for the emitted ash to cover the solar panels, necessitating cleaning for them to function again.

Collaboration Involving the 3 Volcanological and Seismological Observatories of the IPGP and the IPGP Central Services

This project brought together colleagues from the IPGP in Paris, Guadeloupe, Martinique, and Réunion. The data acquisition, lightning protection, and communication modules were designed and built at the OVSF.



La mécanique permettant de rendre solidaires les différents instruments du forage de 50 m a été conçue à l'OVPF à La Réunion en lien avec l'équipe des observatoire volcanologiques et les services de l'atelier de mécanique à Paris. Le premier prototype mécanique a ensuite été testé et validé sur le site de Champs sur Marne avec des essais d'injection d'eau sous pression dans le système. La première mission d'installation a réuni des collègues de Paris, de Guadeloupe, de Martinique et de La Réunion.

Des stations dans des lieux emblématiques

La station de Parnasse, sur les hauteurs de la commune de Saint-Claude, est située au sein d'une propriété de l'IPGP qui héberge les bâtiments de l'ancien observatoire volcanologique. Ce bâtiment, qui hébergeait l'OVSG jusqu'à son évacuation dans la poudrière du fort Delgrès à Basse-Terre lors de l'éruption de La Soufrière en 1976, accueille toujours une station sismique et une station de mesure des déformations par GNSS. L'importance de ce site dans la surveillance de La Soufrière de Guadeloupe est aujourd'hui renforcée par la présence d'une station multi-paramètres en forage. La deuxième station a été installée dans le secteur des chutes du carbet sur une coulée massive d'andesite de plus de 50 mètres d'épaisseur (coulée de l'Habituée). Cette station a été installée avec le soutien de la Région Guadeloupe qui nous laisse exploiter le terrain. La troisième station sera installée sur le parking de la Savane à Mulet, au cœur du Parc National de Guadeloupe et au pied du dôme de la Soufrière, grâce à une collaboration étroite et aux liens tissés de longue date entre l'OVSG-IPGP, le Parc National de Guadeloupe et le Conseil Départemental de Guadeloupe.



The mechanical assembly for the 50-meter borehole instruments was designed at the OVPF in Réunion in collaboration with the volcanological observatory team and the mechanical workshop services in Paris. The first mechanical prototype was then tested and validated at the Champs sur Marne site with pressurized water injection tests. The first installation mission involved colleagues from Paris, Guadeloupe, Martinique, and Réunion.

Stations in Iconic Locations

The Parnasse station, located on the heights of the commune of Saint-Claude, is situated within an IPGP property that houses the buildings of the former volcanological observatory. This building, which housed the OVSG until its evacuation to the powder magazine of Fort Delgrès in Basse-Terre during the 1976 eruption of La Soufrière, still hosts a seismic station and a GNSS deformation measurement station. The importance of this site in monitoring La Soufrière de Guadeloupe is now reinforced by the presence of a multi-parameter borehole station. The second station was installed in the Chutes du Carbet sector on a massive andesite flow over 50 meters thick (the Habituée flow). This station was installed with the support of the Guadeloupe Region, which allows us to use the land. The third station was installed in the parking lot of the Savane à Mulet, in the heart of the Guadeloupe National Park and at the foot of the Soufrière dome, thanks to a close collaboration and long-standing ties between the OVSG-IPGP, the Guadeloupe National Park, and the Guadeloupe Departmental Council.

Tests et validation à Champs sur Marne du vecteur mécanique des instruments et du dispositif d'injection d'eau sous haute pression pour décoller les instruments avant leur retrait en cas de maintenance.

Mechanical tests in Champs sur Marne (IPGP site) Tests and validation in Champs sur Marne of the mechanical vector of the instruments and the high-pressure water injection device to detach the instruments before their removal for maintenance.



Opération de tubage du forage profond sur le site de l'ancien observatoire de Parnasse à Saint-Claude.

Drilling in progress at the site of the former Parnasse observatory (IPGP site) Casing operation of the deep drilling at the site of the former Parnasse observatory in Saint-Claude.



Installation et descente des instruments dans le forage de Parnasse par les équipes des observatoires volcanologiques de l'IPGP. Le vecteur mécanique rassemblant les instruments de mesure est suspendu au câble porteur via un trépied qui le renvoie au treuil. Le bon fonctionnement des instruments est contrôlé tout au long de la descente. Les câbles de communication et les tuyaux sont fixés tous les mètres au câble porteur.

Installation of instruments at the Parnasse site (IPGP site) Installation and lowering of instruments into the Parnasse drilling by the teams of the volcanological observatories of the IPGP. The mechanical vector gathering the measuring instruments is suspended from the carrying cable via a tripod that redirects it to the winch. The proper functioning of the instruments is monitored throughout the descent. The communication cables and pipes are attached to the carrying cable every meter.

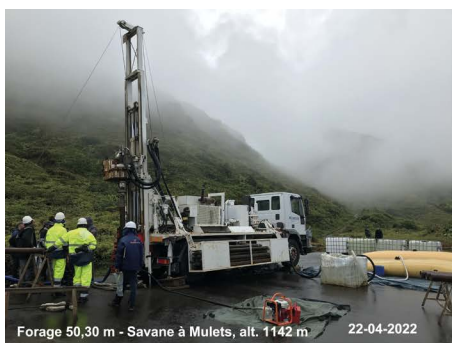


Carottes pour la géologie

Les carottages réalisés sur les 3 sites ont permis de récolter un total de 90,8 m de carottes exploitables (21,8 m à Parnasse, 49,1 m aux chutes du Carbet et 19,9 m à Savane à Mulet). Certaines de ces carottes ont atteint la zone d'anomalie de conductivité initialement repérée en 2011 au pied du dôme (Rosas-Carbajal *et al.*, 2016) et qui a servi de base aux modélisations de loupe de glissement dans les travaux de Peruzzetto *et al.*, 2016). Les carottes montrent que les 50 premiers mètres sous le dôme sont constitués presque exclusivement de fragments de roches partiellement cimentés (brèche), de taille centimétrique (1 à 15 cm) avec un mélange de fragments de lave fracturée massive grise et des fragments altérés, le tout localement mélangé dans une matrice de matériaux plus fins très argilisés. Ces matériaux sont caractéristiques d'une unité d'avalanche de débris provenant probablement de l'effondrement de flanc de l'éruption de 1530. La présence de très nombreuses fractures minéralisées dans différentes directions dans les fragments de brèche, montre que cette zone à la base du dôme est affectée depuis au moins 600 ans par des circulations de fluides qui engendrent une altération importante et une réduction des propriétés mécaniques des matériaux de cette zone

Cores for Geology

The coring carried out at the three sites yielded a total of 90.8 meters of usable cores (21.8 meters at Parnasse, 49.1 meters at Chutes du Carbet, and 19.9 meters at Savane à Mulet). Some of these cores reached the conductivity anomaly zone initially identified in 2011 at the foot of the dome (Rosas-Carbajal *et al.*, 2016), which served as the basis for slip surface modeling in the work of Peruzzetto *et al.* (2016). The cores show that the first 50 meters beneath the dome consist almost exclusively of partially cemented rock fragments (breccia), ranging from 1 to 15 cm in size, with a mixture of massive gray fractured lava fragments and altered fragments, all locally mixed in a matrix of highly clayey finer materials. These materials are characteristic of a debris avalanche unit likely resulting from the flank collapse of the 1530 eruption. The presence of numerous mineralized fractures in various directions within the breccia fragments indicates that this zone at the base of the dome has been affected by fluid circulation for at least 600 years, leading to significant alteration and reduced mechanical properties of the materials in this zone, as well as high porosity and permeability. Indeed, no drilling mud



Forage 50,30 m - Savane à Mulets, alt. 1142 m 22-04-2022



Passé 17 de 23,1 à 23,9 m

Fragments de brèche partiellement cimentée, très grossière, mal triée, avec des fragments de lave fracturée massive grise et des fragments altérés, anguleux à subarrondis poly-lithologiques, localement présence de matrice, fabric en jigsaw-fit des fragments (puzzle), forte altération par circulation de fluides hydrothermaux dans la brèche et le long des surfaces de fractures. Unité proximale d'avalanche de débris



Passé 21 de 28,4 à 28,9 m

Lave andésite massive intensément fracturée dans plusieurs direction, surfaces fractures avec minéralisation d'altération (oxydes de fer, ...) par circulation de fluides hydrothermaux. Fragment de lave massive dans une unité proximale d'avalanche de débris



Passé 23 de 29,9 à 31,4 m

Fragment de lave andésite massive fracturée dans une brèche grossière mal triée, partiellement consolidée, avec des fragments anguleux poly-lithologiques, sans matrice, forte altération par circulation de fluides hydrothermaux dans la brèche et le long des surfaces de fractures. Unité proximale d'avalanche de débris

Opération de carottage et de forage sur le site de Savane à Mulet, au pied du dôme de la Soufrière de Guadeloupe. Exemple de 3 carottes remontées à des profondeurs différentes et montrant différentes compositions de l'édifice volcanique : andésite massive fracturée, brèches et altération par les fluides hydrothermaux.

Composite illustration of the ongoing drilling at the foot of the Soufrière dome with images of the recovered cores. Drilling and coring operation at the Savane à Mulet site, at the foot of the Soufrière de Guadeloupe dome. Example of 3 cores retrieved from different depths showing different compositions of the volcanic edifice : fractured massive andesite, breccias, and alteration by hydrothermal fluids.



tout comme une forte porosité et perméabilité. D'ailleurs, aucune boue de foration n'est remontée en surface, toute l'eau utilisée est partie dans la formation et dans le substratum. L'analyse de ces échantillons permettra entre autres de mieux caractériser les propriétés de résistance mécanique de cette couche de faible résistance mécanique qui a été impliquée dans au moins la dernière déstabilisation de flanc au début de l'éruption de 1530 de l'ère commune et sur laquelle sur laquelle est construit le dôme et circulent des fluides hydrothermaux acides et chauds qui génèrent les résurgences de sources thermales à la base du dôme. Des analyses de ces échantillons sont prévus dans le cadre du projet ANR Mygale (Resp. M. Heap, UNISTRA).

Les signaux enregistrés depuis plusieurs années par le réseau GNSS de l'OVSG sur les flancs et à la base du dôme montrent que celui-ci se déplace latéralement de l'ordre de 8-10 mm/an dans un mouvement interprété comme généré par un glissement basal lent du dôme. La station multiparamètres de la Savane à Mulet permettra de : mieux détecter et comprendre des changements dans les processus en cours dans la partie superficielle du système hydrothermal en lien avec les zones plus profondes ; et de renforcer le suivi de stabilité mécanique des flancs de La Soufrière et de comprendre les forçages qui en contrôlent la dynamique.

returned to the surface ; all the water used was absorbed by the formation and the substratum. The analysis of these samples will, among other things, better characterize the mechanical resistance properties of this low mechanical strength layer, which was involved in at least the last flank destabilization at the beginning of the 1530 eruption and on which the dome is built and through which hot, acidic hydrothermal fluids circulate, generating thermal spring resurgences at the base of the dome. Analyses of these samples are planned as part of the ANR Mygale project (Resp. M. Heap, UNISTRA).

The signals recorded over several years by the OVSG's GNSS network on the flanks and at the base of the dome show that it is moving laterally at a rate of 8-10 mm/year, interpreted as being generated by slow basal sliding of the dome. The multi-parameter station at Savane à Mulet will help to better detect and understand changes in the ongoing processes in the shallow part of the hydrothermal system in relation to deeper zones and to strengthen the monitoring of the mechanical stability of La Soufrière's flanks and understand the forces controlling their dynamics.

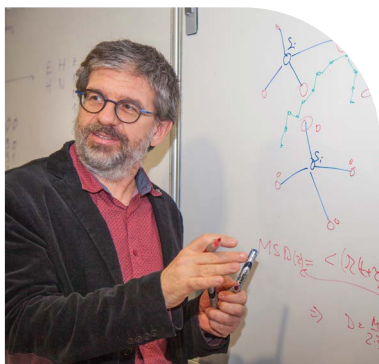
Distribution des données sur Volobsis/Data Distribution on Volobsis : All data acquired by these three stations are available in real-time and archived on the IPGP data center portal (<http://volobsis.ipgp.fr>), the national data centers Epos-France for seismology and geodesy (<https://www.epos-france.fr>), and the European portal EPOS (<https://www.ics-c.epos-eu.org>).

Contact : Arnaud Lemarchand - arnaudl@ipgp.fr



Prix et distinctions

Awards and honours



Razvan Caracas

**Cosmochimie, astrophysique
et géophysique expérimentale**
Cosmochemistry, Astrophysics
and Experimental Geophysics



Médaille Dana de la
Mineralogical Society of
America

Dana Medal of the
Mineralogical Society
of America



Kristel Chanard

Géodésie
Geodesy



Médaille de bronze 2024
du CNRS

2024 CNRS
Bronze Medal



Yann Klinger

**Tectonique et mécanique
de la lithosphère**
Tectonics and Mechanics
of the Lithosphere



ERC Advanced Grant



European Research Council
Established by the European Commission



Charles Le Losq

Cosmochimie, astrophysique et
géophysique expérimentale
Cosmochemistry, astrophysics
and experimental geophysics



Lauréat d'un chaire junior
Awarded a junior chair



Aline Peltier

Volcanologie
Volcanology



Médaille d'honneur de bronze
de l'engagement ultramarin
Bronze Medal of Honour for
Overseas Commitment



Frédéric Moynier

Cosmochimie, astrophysique
et géophysique expérimentale
Cosmochemistry, Astrophysics
and Experimental Geophysics



Fellow 2024





Gustavo Madeira

Cosmochimie, astrophysique et
géophysique expérimentale
Cosmochemistry, Astrophysics
and Experimental Geophysics



Prix Wagner Sessin
Prix de la meilleure thèse 2024
de la São Paulo State University
Wagner Sessin Award
The São Paulo State University
Grand Thesis 2024



Satish Singh

Géosciences marines
Marine Geosciences



ERC Advanced Grant



European Research Council
Established by the European Commission



Nouveaux chercheurs et enseignants-chercheurs

New researchers and professors



Adrien Moulin

Adrien Moulin est un géologue qui décrypte les déformations tectoniques à partir d'indices quantitatifs préservés dans le paysage et les archives sédimentaires. Il étudie le fonctionnement des failles sur des gammes temporelles allant de quelques milliers à quelques centaines de milliers d'années en combinant la géomorphologie quantitative avec les méthodes de datation des processus de surface.

Adrien obtient son doctorat au sein du Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement en 2014. Au cours de sa thèse, il détermine la vitesse des failles actives des Dinarides septentrionales (Slovénie), ce qui lui permet de contraindre un premier modèle cinématique pour cette région. Il poursuit ensuite ses recherches à l'Université de Californie (Davis) où il s'intéresse à l'évolution cinématique de la portion Sud de la faille de San Andreas au cours des derniers 20,000 à 300,000 ans. Il effectue un second post-doctorat en Arabie Saoudite à l'Université du Roi Abdallah où il travaille sur l'ouverture de la Mer Rouge à partir d'indices à Terre et en Mer.

En 2024, il est recruté à l'IPGP en tant que Maître de Conférences où il rejoint l'équipe de Tectonique. Ses travaux actuels cherchent à développer des approches et méthodes originales susceptibles de retracer les processus tectoniques sur des gammes temporelles non-conventionnelles. L'objectif de ce projet est de renforcer les capacités à sonder la variabilité temporelle de l'activité des grandes failles continentales, avec des implications allant de l'estimation de l'aléa sismique à la modélisation de l'évolution des reliefs et des paysages au niveau des frontières de plaques tectoniques.

Adrien Moulin is a geologist who deciphers tectonic deformation using quantitative evidence preserved in the landscape and sedimentary records. He studies fault's behavior over timescales ranging from a few thousands to hundreds of thousands of years by combining quantitative morphology with surface process dating methods.

Adrien obtained his PhD in 2014 at the Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE), while producing the first fault's slip-rate data and kinematic model of the Northern Dinarides (Slovenia). He then continued his research at the University of California, Davis, where he explored the kinematic evolution of the southern section of the San Andreas Fault over the past 20,000 to 300,000 years. He pursued a second postdoctoral position in Saudi Arabia at King Abdullah University, working on the opening of the Red Sea based on onshore and offshore geological evidence.

In 2024, he was appointed Maître de Conférences (Associate Professor) at the Institut de physique du globe de Paris (IPGP), joining the Tectonics team. His current research aims to develop innovative approaches and methods to trace tectonic processes over unconventional timescales. The goal of this project is to enhance our ability to probe the temporal variability of major continental faults, with implications ranging from seismic hazard assessment to modeling the evolution of topography and landscapes at tectonic plate boundaries.



Équipe Team : Tectonique et mécanique de la lithosphère
Lithosphere Tectonics and Mechanics

Thème Theme : Risques naturels
Natural Hazards

Statut Position :
Maître de conférences - Université Paris Cité - *Lecturer*

Contact : amoulin@ipgp.fr



Équipe Team : Tectonique et
mécanique de la lithosphère
*Lithosphere Tectonics
and Mechanics*

Thème Theme : Risques naturels
Natural Hazards

Statut Position :
Directeur de recherche au CNRS -
Research Director at the CNRS

Contact : jolivet@ipgp.fr

Marc Jolivet

Marc Jolivet a rejoint l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) en octobre 2024. Directeur de recherches au CNRS, il intègre l'institut avec l'objectif de développer de nouvelles collaborations au-tour de la géomorphologie des paysages africains, notamment au Botswana et au Rwanda. Ses recherches actuelles s'intéressent aux interactions entre géologie, hydrologie et écosystèmes dans le Delta de l'Okavango, ainsi qu'aux conséquences socio-économiques des glissements de terrain sur les populations d'agriculteurs au Rwanda.

Géologue de formation, Marc Jolivet obtient son doctorat en 2000 à l'Université de Montpellier pour ses travaux sur l'exhumation de la marge nord du plateau tibétain, apportant les premières données de thermochronologie basse température dans cette région. Après un post-doctorat à l'Université de Glasgow, il entre au CNRS en 2002 à Géosciences Montpellier, où il continue à développer ces approches thermochronologiques pour étudier l'évolution géomorphologique des chaînes de montagnes d'Asie centrale (Chine, Mongolie, Sibérie).

Il rejoint Géosciences Rennes en 2009, où il est promu directeur de recherches en 2016. Son approche combine de nombreuses disciplines et repose sur une forte implication dans le travail de terrain. Elle vise à comprendre l'évolution des paysages à long terme et leur relation avec les dynamiques géologiques.

Parallèlement à ses activités de recherche, Marc Jolivet est Délégué Scientifique à l'INSU, en charge de l'interdisciplinarité. À ce titre, il représente l'institut au sein du conseil de pilotage de la MITI (Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires) et pilote les actions liées à la valorisation sociétale des recherches menées à l'INSU.

Marc Jolivet joined the Institut de physique du globe de Paris (IPGP) in October 2024. A CNRS senior researcher (Directeur de recherches), he came to the institute with the goal of building new collaborations around the geomorphology of African landscapes, particularly in Botswana and Rwanda. His current research focuses on the interactions between geology, hydrology, and ecosystems in the Okavango Delta, as well as the socio-economic impacts of landslides on farming communities in Rwanda.

Trained as a geologist, Marc Jolivet earned his PhD in 2000 from the University of Montpellier for his work on the exhumation of the northern margin of the Tibetan Plateau, providing the first low-temperature thermochronology data from that region. Following a postdoctoral fellowship at the University of Glasgow, he joined the CNRS in 2002 at Géosciences Montpellier, where he continued to develop thermochronological approaches to study the geomorphological evolution of mountain ranges in Central Asia (China, Mongolia, Siberia).

In 2009, he joined Géosciences Rennes, where he was promoted to senior researcher in 2016. His interdisciplinary research approach is strongly rooted in fieldwork and aims to understand long-term landscape evolution and its links with geological dynamics.

Alongside his research activities, Marc Jolivet serves as Scientific Delegate for Interdisciplinarity at INSU. In this role, he represents the institute on the steering committee of the MITI (Mission for Transversal and Interdisciplinary Initiatives) and oversees efforts to promote the societal relevance of research conducted at INSU.



Équipe Team : Dynamique des fluides géologiques

Geological Fluid Dynamics

Thème Theme : Risques naturels
Natural Hazards

Statut Position :

Maître de conférences - Université Paris Cité - *Lecturer*

Contact : cabanes@ipgp.fr

Simon Cabanes

Simon Cabanes est devenu maître de conférences à l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) en 2024 au sein de l'équipe *Dynamique des Fluides Géologiques*. Son parcours académique débute par une thèse de doctorat à l'Institut des Sciences de la Terre de Grenoble, intitulée « Contributions des fluctuations turbulentes au champ magnétique induit dans une expérience en sodium liquide », soutenue en 2014 sous la direction de Henri-Claude Nataf et Nathanaël Schaeffer. Après sa thèse, il effectue un post-doctorat d'abord à l'université d'Aix-Marseille, puis au Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) à Paris, avant d'obtenir un financement Marie Curie pour mettre en place des expériences de laboratoire dédiées à l'étude des géantes gazeuses à l'université de La Sapienza de Rome.

Les recherches actuelles de Simon Cabanes portent sur la dynamique des océans des satellites glacés de Jupiter, tels qu'Europe et Ganymède. Son objectif est de comprendre la circulation océanique de ces corps célestes en analysant les signaux magnétiques qu'ils génèrent, combinant ainsi ses compétences en océanographie acquises lors de ses post-doctorats avec son expertise en magnétisme planétaire développée durant sa thèse. Cette approche interdisciplinaire vise à mieux appréhender les processus internes de ces satellites et leur potentiel en termes d'habitabilité.

En tant qu'enseignant-chercheur, Simon Cabanes dispense des cours de physique, notamment en dynamique des fluides appliquée aux écoulements géophysiques et astrophysiques. Son engagement pédagogique et scientifique contribue au rayonnement de l'IPGP dans le domaine de la géophysique planétaire.

Simon Cabanes was appointed Associate Professor at the Institut de physique du globe de Paris (IPGP) in 2024, within the *Geophysical Fluid Dynamics team*. His academic career began with a PhD at the Institut des Sciences de la Terre in Grenoble, entitled « Contributions des fluctuations turbulentes au champ magnétique induit dans une expérience en sodium liquide », defended in 2014 under the supervision of Henri-Claude Nataf and Nathanaël Schaeffer. Following his PhD, he conducted postdoctoral research first at Aix-Marseille University, then at the Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) in Paris, before receiving a Marie Curie fellowship to set up laboratory experiments dedicated to the study of gas giants at La Sapienza University in Rome.

Simon Cabanes' current research focuses on the ocean dynamics of Jupiter's icy moons, such as Europa and Ganymede. His objective is to understand the oceanic circulation within these celestial bodies by analyzing the magnetic signals they generate, combining the oceanographic expertise acquired during his postdoctoral work with the planetary magnetism knowledge developed during his PhD. This interdisciplinary approach aims to deepen our understanding of the internal processes of these satellites and assess their potential habitability.

As a lecturer and researcher, Simon Cabanes teaches physics, particularly fluid dynamics applied to geophysical and astrophysical flows. His educational and scientific commitment contributes to IPGP's prominence in the field of planetary geophysics.



Jérôme Vergne

Très attaché à l'observation et à la surveillance des phénomènes telluriques, Jérôme Vergne a rejoint l'IPGP le 1^{er} juillet 2024 en tant que directeur de l'Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique (OVSM-IPGP).

Diplômé ingénieur de l'École et observatoire des sciences de la Terre (EOST) en 1998, il soutient une thèse à l'Institut de physique du globe de Strasbourg sur l'imagerie lithosphérique de la bordure nord-est du Tibet à partir de méthodes sismologiques passives. Il poursuit ses recherches dans le cadre d'un post-doctorat à l'Oregon State University, en participant au projet Hi-Climb.

En 2003, il devient maître de conférences au Laboratoire de Géologie de l'École normale supérieure, où il contribue à des projets d'imagerie sismologique et développe une méthode de suivi du transport solide dans les rivières via le bruit sismique.

En 2007, il retourne à l'Institut de physique du globe de Strasbourg comme physicien-adjoint pour piloter le développement du Réseau large-bande permanent (RLBP), devenu un pilier de l'infrastructure Résif. Ce réseau passe de 20 à 200 stations en 15 ans, grâce à une mobilisation collective et au soutien de projets comme Résif-Core.

Parallèlement, ses recherches portent sur l'imagerie et le suivi des réservoirs géothermiques profonds. En 2017, il intègre le corps national des astronomes et physiciens (CNAP) et devient directeur-adjoint de l'EOST, en charge des observatoires jusqu'en juin 2024.



Équipe Team : Observatoire
volcanologique et sismologique
de la Martinique (OVSM - IPGP),
Systèmes volcaniques
*Volcanological and Seismological
Observatory of Martinique
(OVSM - IPGP), Volcanic System*

Statut Position : Directeur de
l'OVSM- *Director of the OVSM*

Contact : vergne@ipgp.fr





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 2024, trois études marquantes approfondissent notre compréhension de l'intérieur des planètes. Une première révèle l'existence d'une convection mantellique à méso-échelle, alimentée par des matériaux denses en remontée depuis le manteau profond et qui jouerait un rôle actif dans la tectonique des plaques. Une seconde met en lumière la diversité géochimique des serpentinites océaniques, témoins de la variabilité des échanges chimiques entre la Terre profonde et l'océan dans différents contextes tectoniques. Enfin, un modèle numérique développé à l'IPGP simule la circulation dans les océans sous-glaciaires des lunes de Jupiter et de Saturne, suggérant l'existence de courants planétaires potentiellement détectables via des signaux magnétiques. Ces travaux offrent un regard renouvelé sur la dynamique interne des mondes telluriques et océaniques.

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—particularly that of the Earth.

In 2024, three key studies deepened our understanding of planetary interiors. The first revealed the existence of mesoscale mantle convection driven by dense materials rising from the deep mantle, with implications for plate tectonics. The second highlighted the geochemical diversity of oceanic serpentinites, which reflect chemical exchanges and hydrogen production depending on tectonic settings. Lastly, a numerical model developed at IPGP simulated the circulation in the subsurface oceans of Jupiter's and Saturn's moons, suggesting the presence of planetary-scale currents that could be detected through magnetic signals. These studies offer fresh insight into the internal dynamics of terrestrial and oceanic worlds.

#1

Océans extraterrestres : modéliser la circulation dans les lunes glacées du système solaire

Extraterrestrial oceans : modeling circulation in the icy moons of the solar system

À l'interface entre géophysique et exploration spatiale, l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) joue un rôle clé dans la modélisation des environnements lointains. Grâce aux travaux de ses équipes en dynamique des fluides géologiques et en géomagnétisme, l'IPGP propose une nouvelle plongée numérique au cœur des océans sous-glaciaires des lunes glacées de Jupiter et de Saturne – des mondes intrigants, potentiellement habitables.

Depuis plusieurs décennies, la recherche d'environnements propices à accueillir la vie au-delà de la Terre alimente l'exploration spatiale. Parmi les candidats les plus prometteurs figurent les lunes glacées du système solaire externe : Europe et Ganymède autour de Jupiter, Encelade et Titan autour de Saturne. Sous leurs épaisses croûtes de glace, de vastes océans ont été détectés – certains atteignant jusqu'à quarante fois la profondeur des océans terrestres. La présence en surface de sels, de composés soufrés et de molécules organiques complexes suggère que ces milieux pourraient réunir certaines conditions nécessaires à l'émergence de la vie.

Pour mieux comprendre la dynamique interne de ces océans, des chercheurs des équipes Dynamique des fluides géologiques et Géomagnétisme de l'IPGP ont développé un modèle numérique innovant. Il permet de simuler la circulation océanique en intégrant deux phénomènes majeurs : la convection thermique induite par la chaleur interne et les effets de la rotation planétaire (force de Coriolis).

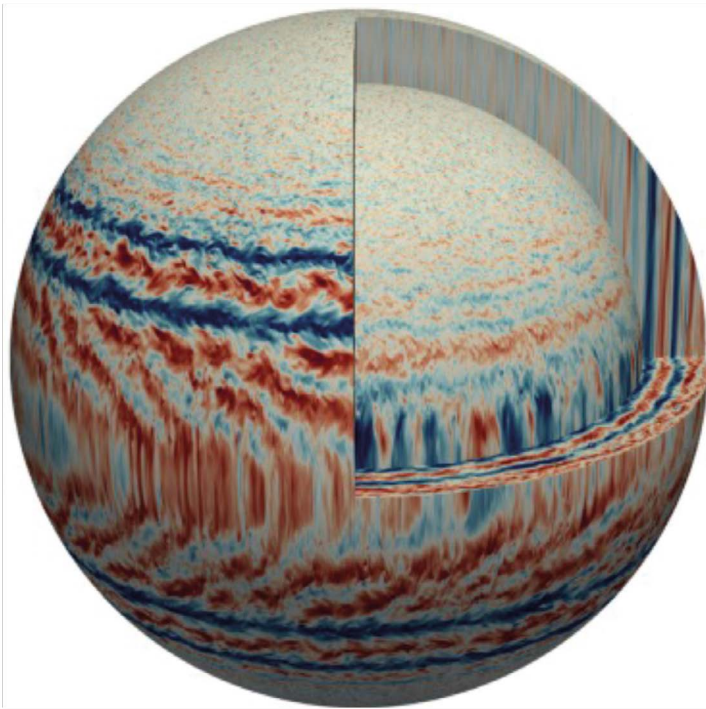
Leurs simulations révèlent l'existence de courants à échelle planétaire. Ces mouvements résultent de l'interaction complexe entre les remontées de chaleur et la rotation de la lune. Une approche théorique a même permis d'estimer les vitesses typiques de ces écoulements, lesquelles pourraient atteindre quelques centimètres par seconde pour Encelade et environ un mètre par seconde pour Ganymède.

At the crossroads of geophysics and space exploration, the Institut de physique du globe de Paris (IPGP) plays a key role in modeling distant environments. Thanks to the work of its teams in geological fluid dynamics and geomagnetism, the IPGP offers a new digital dive into the sub-surface oceans of Jupiter's and Saturn's icy moons – intriguing worlds that may be potentially habitable.

For several decades, the search for environments capable of supporting life beyond Earth has driven space exploration. Among the most promising candidates are the icy moons of the outer solar system: Europa and Ganymede orbiting Jupiter, and Enceladus and Titan orbiting Saturn. Beneath their thick ice crusts, vast oceans have been detected – some reaching up to forty times the depth of Earth's oceans. The presence of salts, sulfur compounds, and complex organic molecules on their surfaces suggests that these environments might meet some of the conditions necessary for life to emerge.

To better understand the internal dynamics of these oceans, researchers from the geological fluid dynamics and geomagnetism teams at IPGP have developed an innovative numerical model. It simulates ocean circulation by incorporating two major phenomena: thermal convection driven by internal heat, and the effects of planetary rotation (Coriolis force).

Their simulations reveal the presence of large-scale planetary currents. These movements result from the complex interaction between rising heat and the moon's rotation. A theoretical approach even allowed the researchers to estimate typical flow velocities, which could reach a few centimeters per second on Enceladus and about one meter per second on Ganymede.



Visualisation de la circulation océanique sous la surface gelée des lunes glacées de Jupiter et de Saturne, telle que modélisée par des simulations numériques dans un océan qui atteindrait 80 % du rayon de la planète. Le code couleur indique que les courants océaniques se déplacent principalement de l'ouest vers l'est (en rouge) ou de l'est vers l'ouest (en bleu) et que ceux-ci sont invariants le long de l'axe de rotation, ce qui doit être interprété comme un effet direct de la rotation planétaire.

Visualization of ocean circulation beneath the frozen surface of Jupiter's and Saturn's icy moons, as modeled by numerical simulations in an ocean extending up to 80% of the planet's radius. The color code indicates that ocean currents primarily flow west to east (in red) or east to west (in blue) and remain invariant along the rotation axis, which should be interpreted as a direct effect of planetary rotation.

Les travaux se poursuivent désormais autour de l'étude des signaux magnétiques susceptibles d'être générés par ces mouvements de l'océan. Détectables à distance, ces signaux pourraient fournir une preuve indirecte mais précieuse des mouvements de ces océans inaccessibles.

Avec l'arrivée prochaine des missions JUICE (ESA) et Europa Clipper (NASA) dans le système jovien, les résultats de l'IPGP pourront être confrontés à des données in situ. Une perspective prometteuse pour mieux comprendre ces mondes lointains et leur potentiel d'habitabilité.

The research now continues with the study of magnetic signals that could be generated by these oceanic flows. Detectable from a distance, these signals could offer an indirect but valuable clue to the movement within these otherwise inaccessible oceans.

With the upcoming arrival of the JUICE (ESA) and Europa Clipper (NASA) missions in the Jovian system, IPGP's results could soon be compared with in situ data. A promising step forward in understanding these distant worlds and their potential for habitability.

Ref : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103524001076>

Contact : Simon Cabanes | cabanes@ipgp.fr

#2

Une nouvelle échelle de convection mantellique révélée par l'observation géophysique

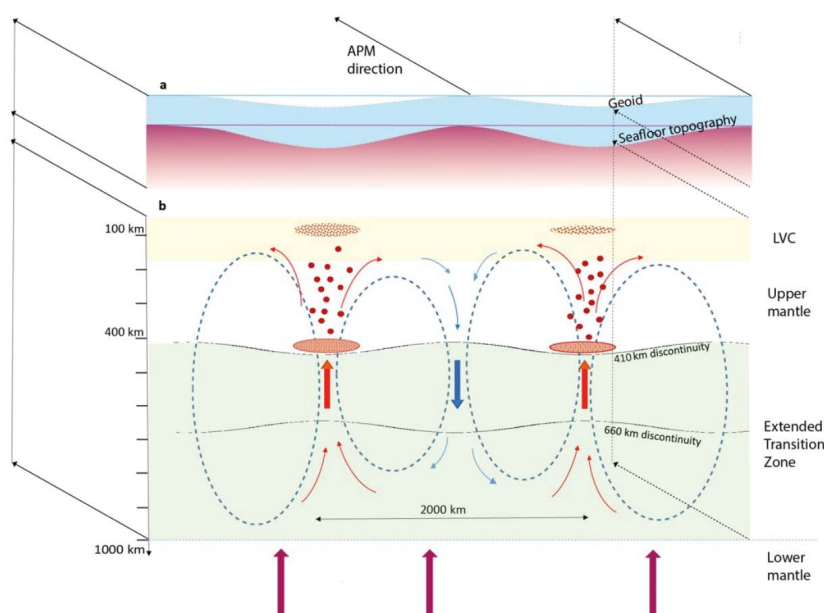
A New Intermediate Scale of Mantle Convection Revealed by Geophysical Observations

Dans le cadre d'une étude menée par des chercheurs de l'Institut de physique du globe de Paris (Université Paris Cité, CNRS), en collaboration avec le Berkeley Seismological Laboratory, une avancée majeure a été réalisée dans l'imagerie de la convection mantellique. Grâce à l'exploitation conjointe de données gravimétriques, bathymétriques et sismologiques de haute précision, l'équipe a mis en évidence une dynamique du manteau à méso-échelle jusqu'ici inédite, contribuant à une meilleure compréhension des liens profonds entre manteau et tectonique des plaques.

Imager le manteau terrestre à haute résolution spatiale reste un défi central pour la géophysique. Dans une étude récente, des ondulations de grande amplitude – espacées de 2 000 km et alignées sur la direction du mouvement actuel des plaques – ont été détectées dans les océans Pacifique et Indien à partir des données du géoïde GRACE

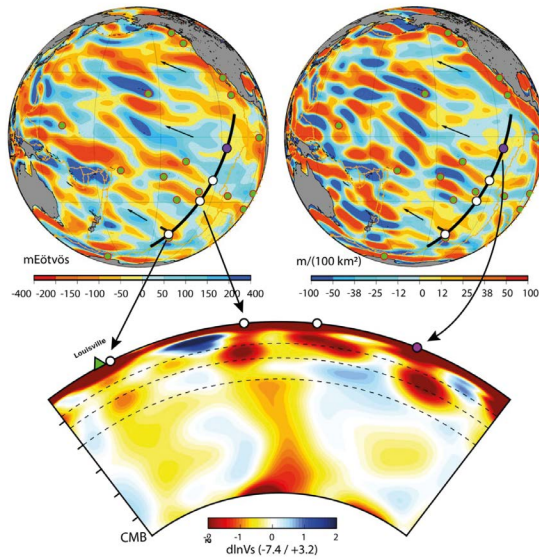
As part of a study led by researchers from the Institut de physique du globe de Paris (Université Paris Cité, CNRS), in collaboration with the Berkeley Seismological Laboratory, a significant breakthrough has been achieved in imaging mantle convection. By combining high-resolution gravity, bathymetry and seismic data, the team has revealed an unprecedented mesoscale mantle dynamic, offering new insights into the deep connections between mantle processes and plate tectonics.

Imaging the Earth's mantle at high spatial resolution remains a major challenge in geophysics. In a recent study, large-scale undulations—approximately 2,000 km in wavelength and aligned with the present-day plate motion—were detected in the Pacific and Indian Oceans using GRACE



Undulations méso-échelles du géoïde et de la bathymétrie, alignées avec la direction actuelle du mouvement de la plaque Pacifique, exprimées en gradients de gravité (gauche) et en gradients de pentes des fonds océaniques (droite), et leur correspondance avec les vitesses sismiques lentes du modèle SEMUCB-WM1 (bas). L'ensemble de ces signaux permet de documenter une convection thermo-chimique méso-échelle dans le manteau supérieur et la zone de transition étendue, avec fusion partielle et recristallisation des roches en profondeur.

Meso-scale undulations of the geoid and bathymetry, aligned with the current direction of Pacific plate motion, expressed as gravity gradients (left) and seafloor slope gradients (right), and their correlation with slow seismic velocities from the SEMUCB-WM1 model (bottom). Together, these signals provide evidence for meso-scale thermochemical convection in the upper mantle and the extended transition zone, involving partial melting and recrystallization of rocks at depth. ©French & Romanowicz (2015), Panet *et al.* (2022, 2024).



Modèle proposé de convection méso-échelle dans le manteau supérieur et la zone de transition, expliquant les observations. Les upwellings convectifs coïncident avec les creux de la bathymétrie et du géoïde, et avec les vitesses sismiques lentes du modèle SEMUCB-WM1 (French & Romanowicz, 2015). Au passage de la transition de phase entre wadsleyite et olivine et en présence d'eau, de la fusion partielle a lieu dans les upwellings. Les matériaux fondus et recristallisés, plus denses car enrichis en fer, s'accumulent au dessus de la zone de transition tandis qu'une petite fraction est entraînée jusqu'à l'asthénosphère. ©Panet *et al.* (2024).

Proposed model of meso-scale convection in the upper mantle and transition zone, explaining the observations. Convective upwellings coincide with depressions in bathymetry and geoid, as well as with the slow seismic velocities of the SEMUCB-WM1 model (French & Romanowicz, 2015). As the upwellings cross the phase transition between wadsleyite and olivine, and in the presence of water, partial melting occurs. The molten and recrystallized materials—denser due to iron enrichment—accumulate above the transition zone, while a small fraction is transported up to the asthenosphere.

et de la bathymétrie océanique. Ces ondulations coïncident spatialement avec des anomalies sismiques lentes dans le manteau supérieur et la zone de transition, révélant l'existence d'une convection à méso-échelle.

Ce phénomène ne peut être expliqué par des variations thermiques seules. Il implique des excès de masse dans les zones chaudes, suggérant la présence de matériaux denses remontant du manteau profond. Les modélisations réalisées s'appuient sur un cadre thermo-chimique bidimensionnel simplifié atteignant jusqu'à 1 000 km de profondeur. Les résultats suggèrent que cette convection méso-échelle pourrait être, au moins en partie, pilotée par des forçages profonds et exercer ainsi un rôle actif sur la dynamique des plaques lithosphériques.

Les excès de masse observés seraient liés à la formation de couches minces de matériaux enrichis en fer, issus de processus de fusion partielle, déshydratation et recristallisation au sommet de la zone de transition. Une fraction de ce matériel serait ensuite entraînée par des remontées chaudes vers l'asthénosphère, où elle pourrait être redistribuée latéralement. Ces travaux apportent un nouvel éclairage sur la dynamique interne de la Terre et confirment indirectement la présence d'eau dans la zone de transition du manteau.

geoid data and oceanic bathymetry. These features coincide geographically with slow seismic velocity anomalies in the upper mantle and transition zone, pointing to the existence of mesoscale convection.

This convection cannot be explained by thermal variations alone; it requires mass excesses in hot regions, suggesting the presence of dense material rising from deeper in the mantle. The team developed simplified two-dimensional thermo-chemical models extending to 1,000 km depth, showing that such circulation may partly result from deep mantle forcing and could interact with, or even partially control, plate motions.

The observed mass anomalies may reflect the formation of thin layers of dense, iron-enriched material produced by partial melting, dehydration, and subsequent recrystallization near the top of the transition zone. Portions of this material are entrained by upwelling flows and accumulate in the asthenosphere, where they may be laterally redistributed. These findings not only shed new light on Earth's internal dynamics but also support the presence of water in the mantle transition zone.

Ref : Panet, I., Greff-Lefftz, M., & Romanowicz, B. (2024). **Partial melt in mesoscale upper mantle upwellings beneath ocean basins.** *Earth and Planetary Science Letters*, 639, 118763.

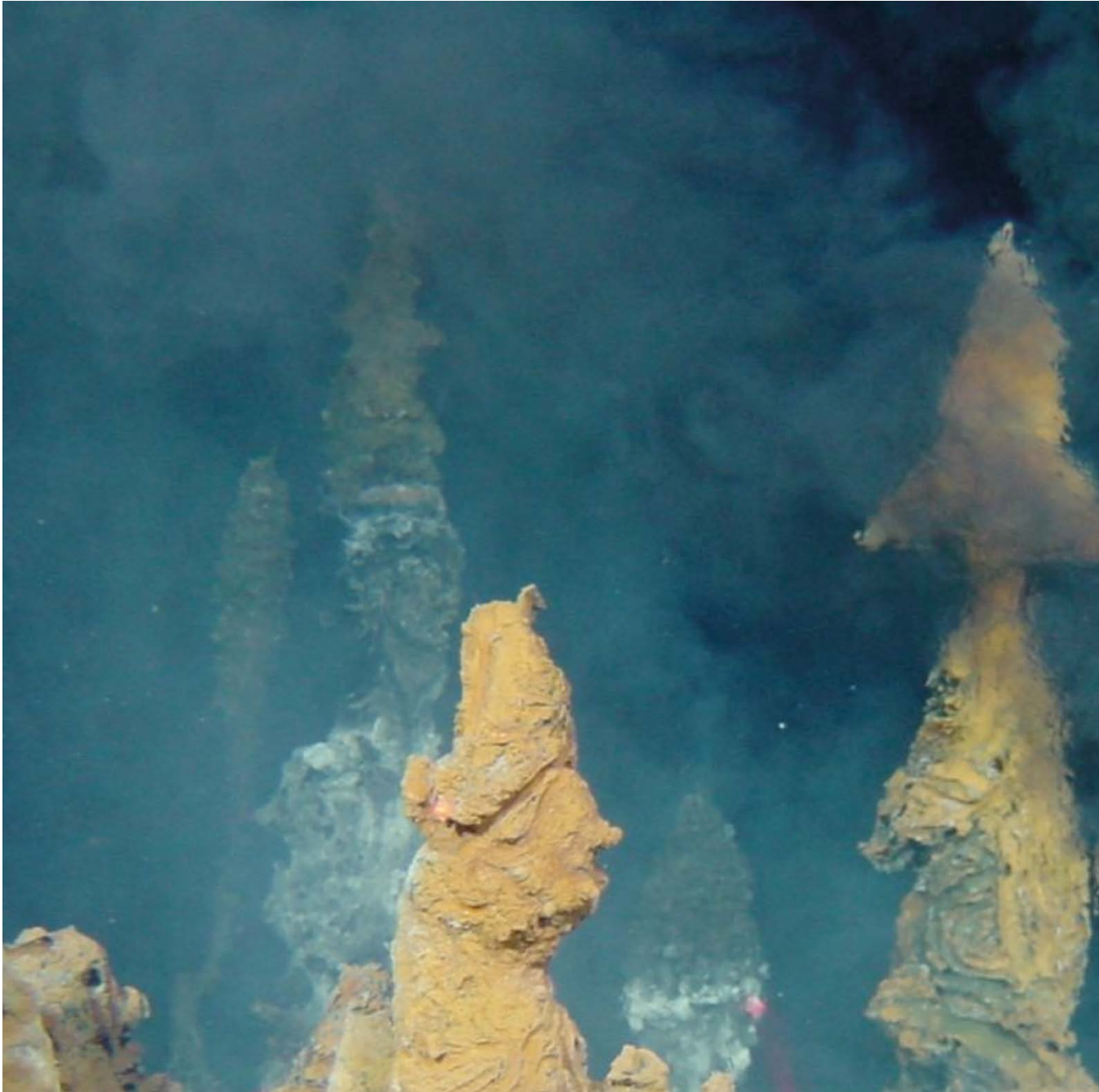
French, S.W., & Romanowicz, B. (2015). **Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots.** *Nature*, 525, 95-99.

Contact : Isabelle Panet | panet@ipgp.fr

#3

Les serpentinites abyssales, témoins de la variété géochimique du plancher océanique terrestre

Abyssal serpentinites, evidence of the geochemical variety of the Earth's ocean floor





En comparant l'enregistrement géochimique de différents types de serpentinites abyssales, une équipe française met en évidence des disparités chimiques majeures dans les roches composant le plancher océanique à travers le monde.

By comparing the geochemical record of different types of abyssal serpentinites, a French team has revealed major chemical disparities in the rocks that make up the ocean floor around the world.

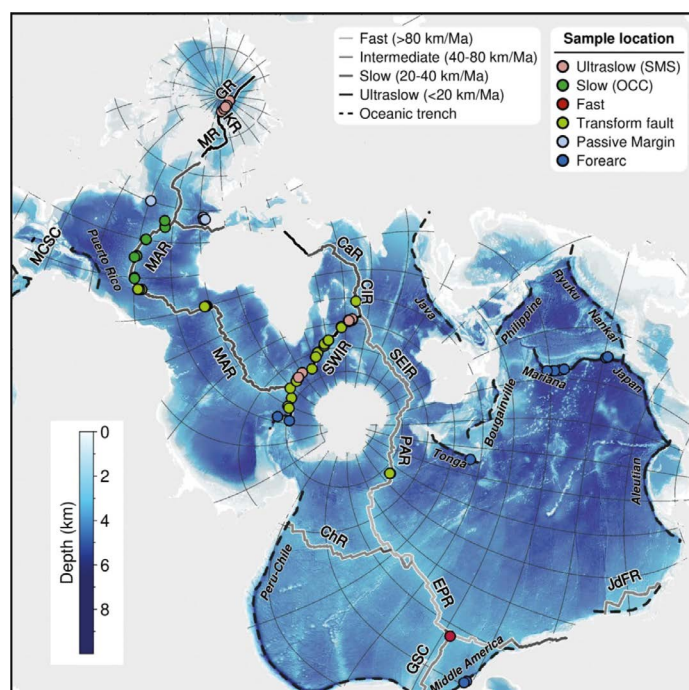
@Ifremer

Les serpentinites sont des roches ubiquistes¹ du plancher océanique, qui se forment par hydratation des péridotites du manteau (transformation des minéraux olivine et pyroxène en serpentine par réaction avec des fluides hydrothermaux). Au cours des dernières décennies, il a été reconnu que leur formation change la rhéologie et la composition de la lithosphère, jouant ainsi un rôle majeur sur les cycles géodynamiques et géochimiques terrestres. Toutefois, ces études étaient jusqu'à présent focalisées sur des contextes régionaux. Une équipe française menée par un chercheur de l'IPGP a entrepris une compilation des données géochimiques existantes sur des serpentinites collectées dans différents océans du globe par forage, dragage ou à l'aide de submersibles. Ces scientifiques mettent ainsi en évidence des hétérogénéités chimiques majeures en fonction des contextes géodynamiques et tectoniques.

À proximité des dorsales, le régime thermique de la lithosphère océanique s'avère généralement proportionnel à l'abondance en roches magmatiques, jouant ainsi un rôle majeur dans la nature des échanges géochimiques lors de la serpentinisation. Au niveau des dorsales ultra-lentes et des failles transformantes, la faible activité magmatique favorise une serpentinisation par une eau de mer peu modifiée, qui s'imprime dans la signature géochimique des roches. À l'inverse, au niveau des dorsales lentes ou rapides, l'interaction à haute température entre l'eau de mer et les abondantes roches magmatiques modifie les propriétés physico-chimiques des fluides, alors plus

Serpentinites are ubiquitous¹ seafloor rocks, formed by hydration of mantle peridotites (transformation of the minerals olivine and pyroxene into serpentine by reaction with hydrothermal fluids). In recent decades, it has been recognised that their formation changes the rheology and composition of the lithosphere, playing a major role in the Earth's geodynamic and geochemical cycles. However, until now, these studies have focused on regional contexts. A French team led by an IPGP researcher has now compiled existing geochemical data on serpentinites collected in different oceans around the world by drilling, dredging or using submersibles. These scientists have highlighted major chemical heterogeneities as a function of geodynamic and tectonic contexts.

Near ridges, the thermal regime of the oceanic lithosphere is generally proportional to the abundance of magmatic rocks, playing a major role in the nature of geochemical exchanges during serpentinisation. At ultra-slow ridges and transform faults, low magmatic activity favours serpentinisation by slightly modified seawater, which is imprinted in the geochemical signature of the rocks. Conversely, at slow or fast ridges, high-temperature interaction between seawater and abundant magmatic rocks modifies the physico-chemical properties of the fluids, which are then more inclined to the mobility and storage of redox-sensitive



Projection Spilhaus montrant la distribution des données géochimiques (éléments majeurs, traces, volatils et isotopes) existantes sur les serpentinites abyssales en fonction du contexte géodynamique et tectonique.

Spilhaus projection showing the distribution of existing geochemical data (major, trace, volatile and isotopic elements) on abyssal serpentinites as a function of geodynamic and tectonic context.



favorables à la mobilité et au stockage des éléments sensibles à l'oxydoréduction, ou redox (U, Eu, Ce, As, Sb), dont les métaux (Zn, Cu). Ces différences conduisent à des signatures géochimiques contrastées des serpentinites à travers le monde, témoins de la variabilité des échanges chimiques. En revanche, le comportement des éléments non sensibles au redox mais mobiles dans les fluides (Cs, Ba, Rb, B ou Li) se révèle peu affecté par ces variations de contextes, induisant un enregistrement géochimique homogène de ces éléments dans les serpentinites. La serpentinitisation des péridotites en contexte d'avant-arc², où la chimie des fluides est largement influencée par la subduction sous-jacente, apparaît comme une exception à travers les contextes abyssaux.

En outre, ces observations montrent que les contextes géodynamiques et tectoniques de serpentinitisation influencent les processus d'oxydation du fer (Fe), et donc la production d'hydrogène (H₂) au fond des océans. En particulier, la distribution du Fe³⁺ dans les serpentinites est influencée par la teneur en magnésium des roches, un taux élevé favorisant la formation de brucite et empêchant l'oxydation du Fe et la production d'H₂.

elements (U, Eu, Ce, As, Sb), including metals (Zn, Cu). These differences lead to contrasting geochemical signatures of serpentinites around the world, reflecting the variability of chemical exchanges. On the other hand, the behaviour of elements that are not redox-sensitive but are mobile in fluids (Cs, Ba, Rb, B or Li) is little affected by these variations in context, leading to a homogeneous geochemical record of these elements in serpentinites. Serpentinisation of peridotites in forearc² contexts, where fluid chemistry is largely influenced by the underlying subduction, appears to be an exception in abyssal contexts.

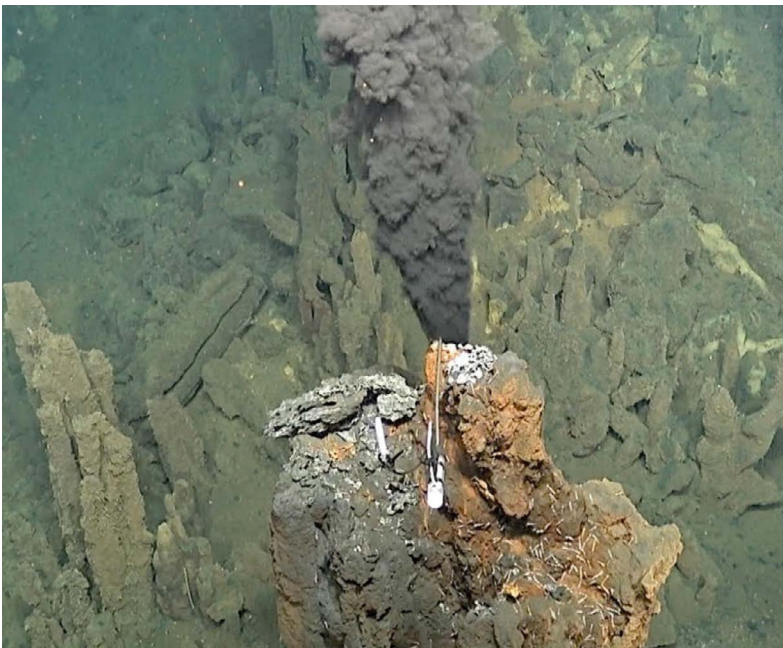
In addition, these observations show that the geodynamic and tectonic contexts of serpentinitisation influence the iron (Fe) oxidation processes, and therefore the production of hydrogen (H₂) at the bottom of the oceans. In particular, the distribution of Fe³⁺ in serpentinites is influenced by the magnesium content of the rocks, a high level favouring the formation of brucite and preventing the oxidation of Fe and the production of H₂.

1. Ubiquitous rocks = rocks found in many different places around the globe

2. Forearc basin = hollow submarine space located on the thrust plate of a subduction zone between the volcanic arc and the sedimentary accretionary prism.

1. Roches ubiquistes = roches présentes à de nombreux endroits différents à travers le globe.

2. Bassin d'avant-arc = espace sous-marin en creux situé sur la plaque chevauchante d'une zone de subduction entre l'arc volcanique et le prisme d'accrétion sédimentaire.



Fumeur noir riche en H₂ sur substrats de serpentinites, site Rainbow, dorsale-médio-océanique (36°N). Campagne Arc-en-sub, Andreani & Escartin, 2022, doi.org/10.17600/18000663

H₂-rich black smoker on serpentinite substrates, Rainbow site, mid-ocean ridge (36°N). Arc-en-sub campaign, Andreani & Escartin, 2022, doi.org/10.17600/18000663

Ref : B. Debret, M. Andreani, M. Godard, **A review of abyssal serpentinite geochemistry and geodynamics**, *Earth-Science Reviews*, Vol. 258, 2024, 104910, DOI : 10.1016/j.earscirev.2024.104910

Contact : Baptiste Debret | debret@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 2024, trois avancées majeures ont marqué les recherches sur les risques naturels. En Guadeloupe, une nouvelle méthode d'imagerie sismique révèle avec une précision inégalée la structure interne de la Soufrière, identifiant des poches de magma potentiellement éruptibles. Dans le fjord Dickson au Groenland, un effondrement massif de glacier et de roche lié au changement climatique a généré une seiche sismique mondiale durant neuf jours, illustrant l'interconnexion entre climat et dynamique terrestre. Enfin, l'étude de carottes sédimentaires profondes dans les Antilles a permis de retracer 120 000 ans de méga-séismes, apportant une base solide pour réévaluer l'aléa sismique de la région.

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 2024, three major breakthroughs marked research on natural hazards. In Guadeloupe, a new seismic imaging method revealed the internal structure of La Soufrière volcano with unprecedented precision, identifying magma pockets with eruption potential. In Dickson Fjord, Greenland, a massive glacier and rock collapse—linked to climate change—generated a global seismic seiche lasting nine days, highlighting the interconnection between climate and the dynamics of the solid Earth. Finally, the analysis of deep sediment cores in the Caribbean enabled tracing 120,000 years of megathrust earthquakes, providing a robust foundation for reassessing seismic hazard in the region.

#1

Les sédiments des bassins sous-marins profonds révèlent l'histoire des méga-séismes aux Petites Antilles

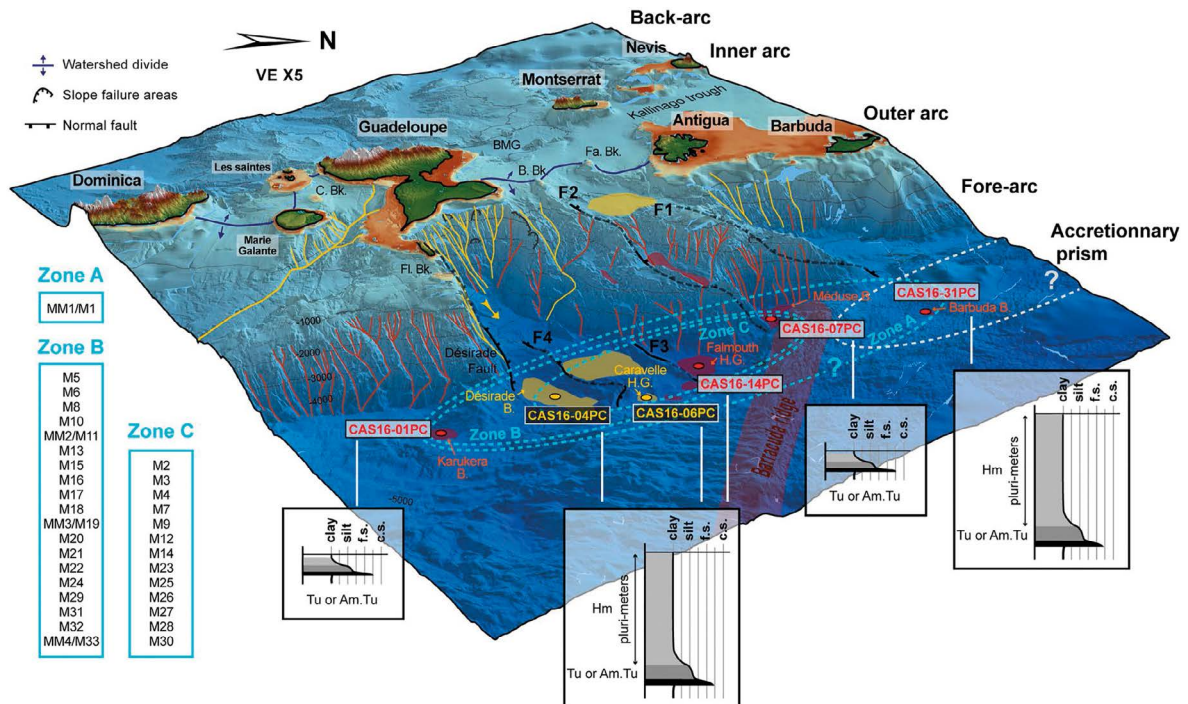
Deep submarine basin sediments reveal the history of mega-earthquakes in the Lesser Antilles

Une équipe internationale dirigée par des chercheuses de l'IPGP a, pour la première fois, retracé l'histoire des grands séismes des Petites Antilles au cours des 120 derniers milliers d'années. L'étude s'appuie sur l'analyse de plusieurs carottes sédimentaires longues de plus de 25 m, prélevées dans des bassins profonds (à plus de 5000 m sous le niveau de la mer) à l'Est des îles, au cours de la campagne CASEIS à bord du navire océanographique Pourquoi Pas ?. Des dépôts sédimentaires catastrophiques atteignant des épaisseurs de plus de 8 m et résultant d'avalanches sous-marines de grande ampleur ont pu être identifiés, dans plusieurs bassins profonds de l'avant arc des Antilles. Certains dépôts, très similaires à ceux produits par le séisme de Tohoku en 2011 au Japon ont très probablement été générés par de très grands séismes, peut-être associés à des tsunamis. La trace de 33 grands séismes ayant eu lieu au cours des 120 derniers milliers d'années a pu être retrouvée. Le séisme le plus récent se serait produit il y a environ 3000 ans. Cette reconstruction de l'histoire sismique des petites Antilles devrait permettre de mieux contraindre l'aléa sismique dans la région.

Alors que deux séismes historiques majeurs, meurtriers et destructeurs, ont frappé les îles de l'arc des Antilles (le 11 janvier 1839 au large de la Martinique et le 8 février 1843 au large de la Guadeloupe), le potentiel sismogénique de la zone de subduction des Petites Antilles, où les plaques Américaines plongent sous la plaque Caraïbe, est peu contraint et encore débattu. Les données court terme des stations GNSS tendent à montrer que l'interface de subduction glisserait de manière aiséismique tandis que les données géologiques (coraux) suggèrent que cette interface est bloquée depuis plusieurs décennies et pourrait rompre pour produire un séisme dans le futur. L'origine des séismes historiques de 1839 et 1843 reste également incertaine. Ainsi, la menace d'un séisme de subduction de l'ampleur des séismes de Sumatra en 2004 ou de Tohoku-Oki en 2011 implique qu'il est primordial d'acquérir de nouvelles informations permettant de retracer l'histoire sismique de la zone de subduction des Antilles.

An international team led by IPGP researchers has, for the first time, revealed the history of major earthquakes in the Lesser Antilles over the last 120,000 years. The study is based on the analysis of several sediment cores more than 25 m long, taken from deep basins (more than 5,000 m below sea level) to the east of the islands, during the CASEIS campaign aboard the oceanographic vessel Pourquoi Pas?. Catastrophic sedimentary deposits reaching thicknesses of over 8 m and resulting from large-scale submarine avalanches were identified in several deep basins in the fore-arc of the Lesser Antilles. Some deposits, very similar to those produced by the 2011 Tohoku earthquake in Japan, were most likely generated by very large earthquakes, perhaps associated with tsunamis. The sedimentary records of 33 major earthquakes over the last 120,000 years have been found. The most recent earthquake is thought to have occurred around 3,000 years ago. This reconstruction of the seismic history of the Lesser Antilles should enable us to better constrain seismic hazards in the region.

While two major, deadly and destructive historic earthquakes have struck the islands of the Antilles arc (January 11, 1839 offshore Martinique, and February 8, 1843 offshore Guadeloupe), the seismogenic potential of the Lesser Antilles subduction zone, where the American plates subduct beneath the Caribbean plate, is poorly constrained and still debated. Short-term data from GNSS stations tend to show that the subduction interface is sliding aseismically, while geological data (corals) suggest that this interface has been locked for several decades and could rupture to produce an earthquake in the future. The origin of the historic earthquakes of 1839 and 1843 also remains uncertain. Thus, the threat of a subduction earthquake of magnitude comparable to the 2004 Sumatra or 2011 Tohoku-Oki earthquakes implies that it is crucial to acquire new information to retrace the seismic history of the Lesser Antilles subduction zone.



Carte 3D de la zone d'étude montrant les principales caractéristiques morphologiques, la zone de corrélation carotte-à-carotte et les faciès sédimentaires associés à l'événement MM1. Lignes rouges : canyons confinés dans la pente ; Lignes jaunes : canyons connectés à la zone peu profonde (cartographiés par Seibert *et al.* (2020)) ; Zone rouge : bassins isolés ; Zones jaunes : bassins connectés ; Lignes noires : failles normales étiquetées F1 à F4 et faille de la Désirade ; lignes pointillées : failles situées derrière les reliefs (Feuillet *et al.*, 2001) ; Cercles pointillés bleu clair : étendue de la corrélation des turbidites entre les carottes, avec les événements sismiques associés représentés dans les rectangles bleu clair à gauche ; Faciès sédimentaires de l'événement majeur de la marge : turbidites (Tu) ou turbidites amalgamées (Am. Tu) dans les bassins Méduse et Karukera, et dépôts de plusieurs mètres d'épaisseur de « Homogénite + turbidite » (Hm : Homogénite) dans les bassins du Fosse de la Désirade ; pour l'événement MM1, il est probable qu'il y ait une corrélation avec HmTu dans le bassin de Barbuda ; C.Bk. : banc Colombien ; Flandre Bk. : banc de Flandre ; B.Bk. : banc Bertrand ; Fa. Bk. : banc de Falmouth ; BMG : Graben Bouillante-Montserrat ; B. : bassin ; H.G. : demi-Graben.

3D map of the study area showing the main morphologic features, the core-to-core correlation area, and sediment facies associated with the MM1 event. Red lines : canyons confined in the slope ; Yellow lines : canyons connected to the shallow area (mapped by Seibert *et al.* (2020)) ; Red area : isolated basins ; Yellow areas : connected basins ; Black lines : normal faults labeled F1 to F4 and the Désirade fault ; Dashed lines : faults behind the reliefs (Feuillet *et al.*, 2001) ; Light blue dashed circle : extent of turbidite correlation across cores, with the seismic events associated shown in the light blue rectangles on the left ; Sedimentary facies of the Major Margin event : turbidites (Tu) or amalgamated turbidite (Am. Tu) in the Méduse and Karukera Basins, and several-meter-thick "Homogenite + turbidite" (Hm : Homogenite) deposits in the Désirade Trough basins ; for MM1, there is likely a correlation with HmTu in the Barbuda Basin ; C.Bk.: Colombian Bank ; Flandre Bk.: Flandre Bank ; B.Bk.: Bertrand Bank ; Fa. Bk.: Falmouth Bank ; BMG : Bouillante-Montserrat Graben ; B.: Basin ; H.G.: Half Graben.

Il a été démontré que de tels séismes peuvent remobiliser des sédiments dans les environnements sous-marins. L'équipe menée par deux chercheuses de l'IPGP a recherché la trace de ces dépôts sédimentaires. Pour cela, plusieurs carottes de sédiments ont été récoltées grâce au carottier à piston Calypso du navire de la flotte océanographique française Pourquoi Pas ? lors de l'expédition CASEIS (Feuillet, 2016). Ces carottes géantes (jusqu'à 26 m de longueur) ont été prélevées dans les bassins profonds en avant de l'arc volcanique, au-dessus de l'interface de subduction là où se serait produit le séisme de 1843. L'analyse des sédiments (propriétés physiques, chimiques, granulométrie, datations...) a permis d'identifier et de caractériser les dépôts générés par 33 séismes ayant eu lieu au cours des derniers 120 milliers d'années. Quatre de ces événements sont associés à des dépôts exceptionnels dits HmTu (turbidite/homogenite) de 8 m d'épaisseur. Les caractéristiques sédimentologiques de ces dépôts et leur étendue

It has been shown that such earthquakes can remobilize sediments in underwater environments. The research team looked for traces of these sedimentary deposits. To reach this goal, several sediment cores were sampled using the Calypso piston corer of the French oceanographic fleet vessel Pourquoi Pas ? during the CASEIS expedition (Feuillet, 2016). These giant cores (up to 26 m long) were taken from deep fore-arc basins, above the subduction interface, where the 1843 earthquake is thought to have occurred. Analysis of the sediments (physical and chemical properties, granulometry, dating, etc.) allowed to identify and characterize deposits generated by 33 earthquakes over the last 120,000 years. Four of these events are associated with 8 m thick exceptional HmTu (turbidite/homogenite) deposits. The sedimentological characteristics of these deposits



géographique, sur des distances de plus de 170 km, suggèrent qu'ils ont été générés par des séismes majeurs. Des calculs d'accélération du sol montrent que des mégaséismes de subduction seraient les seuls assez forts pour déstabiliser et remobiliser ainsi les sédiments. La longueur de l'enregistrement est inédite et c'est la première fois que le comportement sismogénique d'une zone de subduction peut être documenté sur une telle échelle de temps. Ceci permet de révéler un comportement atypique de la zone de subduction des Antilles : en effet, trois super-cycles sismiques d'une durée de 15 à 25 milliers d'années ont été identifiés. Durant ces super-cycles, plusieurs mégaséismes se sont produits avec des temps de récurrence décroissants de 5000 à 2000 ans. Le dernier méga-séisme s'est produit il y a environ 3000 ans.

Cette étude apporte des informations précieuses sur l'histoire des grands séismes aux Antilles qui permettent de mieux contraindre l'aléa sismique dans la région.

and their large geographical extent over more than 170 km, suggest that they were generated by major earthquakes. Calculations of ground accelerations show that subduction mega-earthquakes only are strong enough to have destabilized and remobilized the sediments. The length and duration of the record is unprecedented, and the seismogenic behavior of a subduction zone is here documented for the first time over such a long time period.

Three seismic super-cycles lasting between 15,000 and 25,000 years have been identified. During these super-cycles, several mega-earthquakes occurred with recurrence times decreasing from 5,000 to 2,000 years. The last mega-earthquake occurred around 3,000 years ago.

This study provides crucial information on the history of major earthquakes in the Lesser Antilles, enabling to better constrain seismic hazards in the region.

Ref : CASEIS marine cruise, Feuillet, 2016, <https://doi.org/10.17600/16001800>

Seibert, C., Feuillet, N., Ratzov, G., Beck, C., Morena, P., Johannes, L., *et al.* (2024). **Sedimentary records in the Lesser Antilles fore-arc basins provide evidence of large late Quaternary megathrust earthquakes.** *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 25, e2023GC011152. DOI : 10.1029/2023GC011152

Funding : ANR CARQUAKES n° ANR-17-CE03-0006 et projet Interreg PREST

Contact : Nathalie Feuillet | feuillet@ipgp.fr



#2

Un énorme effondrement de glacier et de roches, lié au réchauffement climatique, fait vibrer la Terre pendant 9 jours

A massive landslide, related to climate warming, generates a global nine-day seismic signal

Le 16 septembre 2023, plusieurs sismologues ont détecté un signal sismique sans précédent enregistré par les stations sismiques du monde entier. Ce signal s'est manifesté sous la forme d'un bourdonnement régulier, oscillant toutes les 92 secondes pendant une durée exceptionnelle de neuf jours. Qualifié d'« Objet Sismique Non Identifié », ce signal ne correspondait ni à un tremblement de terre, ni à une activité volcanique, ni à aucun phénomène naturel connu. Les chercheurs du monde entier, notamment de l'IPGP, se sont réunis en ligne pour analyser et modéliser les données et résoudre cette énigme.

Un glissement de terrain à l'origine de l'événement et d'un tsunami destructeur

Grâce aux données sismiques et infrasonores, la source de ce signal étrange est rapidement localisée dans le fjord Dickson, à l'est du Groenland, une région isolée et inhabitée, à l'exception d'une station militaire. Effectivement, le 16 septembre, un gigantesque glissement de terrain, déclenché par l'effondrement d'une montagne et de la portion inférieure d'un glacier est détecté par imagerie satellitaire et par une mission du Danish Arctic Command. Il génère un tsunami géant dont l'amplitude initiale ("backsplash") atteint plus de 200 mètres, l'un des plus importants jamais observés au Groenland, et qui ravage le fjord et ses environs. À 70 kilomètres de là, la vague submerge une station militaire. Un capteur de niveau d'eau dans le fjord enregistre une montée brutale du niveau marin. Toutefois, la dynamique rapide et violente du phénomène échappe à l'instrument, qui ne mesure le niveau d'eau que toutes les 15 minutes.

L'analyse des signaux sismiques : une clé pour déchiffrer l'événement

Ce sont les sismomètres, dont le plus proche est à environ 100 km, qui permettent de révéler la dynamique du glissement de terrain et du tsunami associé. Les analyses menées par les équipes de l'IPGP et de l'EOST, ainsi que leurs collaborateurs internationaux, ont permis de reconstruire l'évolution du glissement à partir des signaux

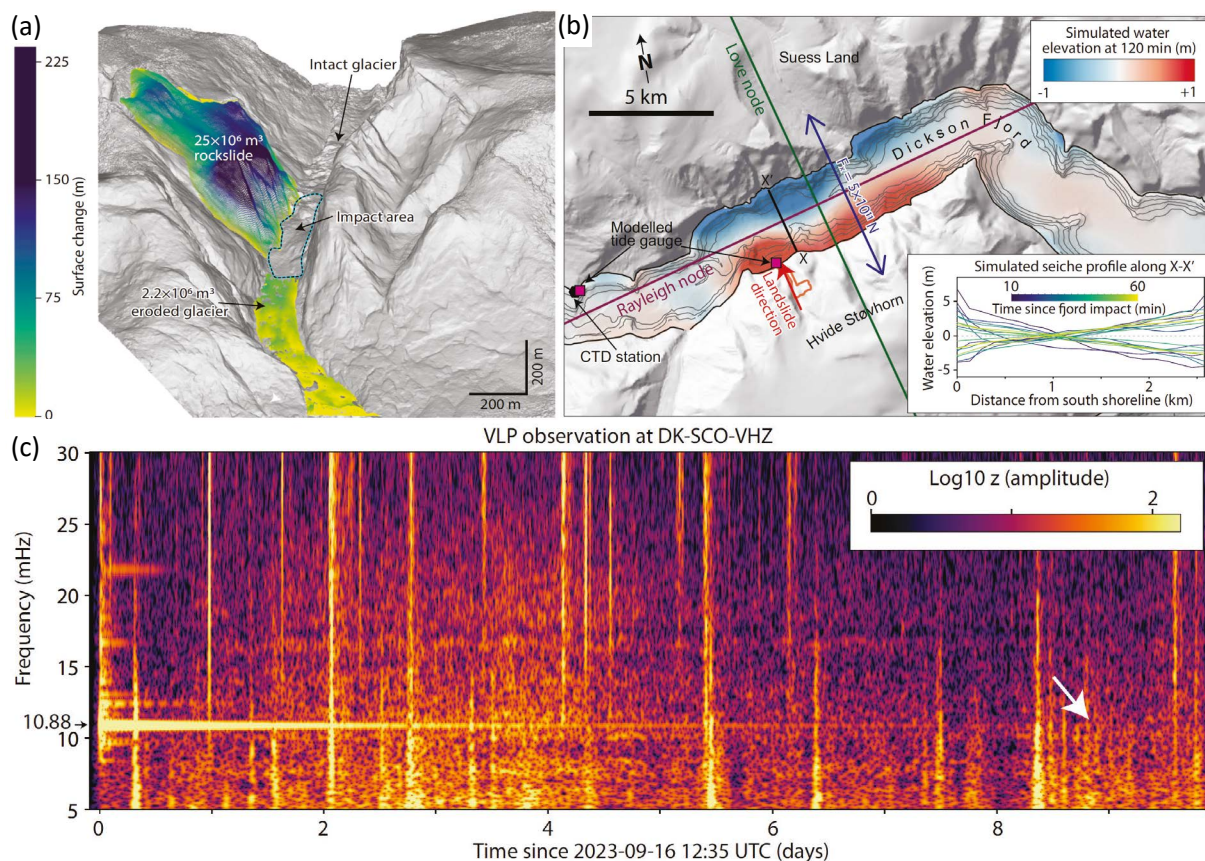
On 16 September 2023, several seismologists detected an unprecedented seismic signal recorded by seismic stations around the world. The signal took the form of a regular buzzing sound, oscillating every 92 seconds for an exceptional period of nine days. Described as an 'Unidentified Seismic Object', this signal did not correspond to any earthquake, volcanic activity or any known natural phenomenon. Researchers from all over the world, including the IPGP, got together online to analyse and model the data and solve this enigma.

An event generated by a landslide and a destructive tsunami

Thanks to seismic and infrasound data, the source of this strange signal was quickly located in the Dickson Fjord, Eastern Greenland, an isolated and uninhabited region, with the exception of a military station. Indeed, on 16 September, a gigantic landslide, triggered by the collapse of a mountain flank and the lower part of a glacier, was detected by satellite imagery and by a Danish Arctic Command mission. It generated a giant tsunami with an initial amplitude ('backsplash') of more than 200 metres, one of the largest ever observed in Greenland, which devastated the fjord and its surroundings. 70 kilometres away, the wave submerged a military station. A water level sensor in the fjord recorded a sudden rise in sea level. However, the rapid and violent dynamics of the phenomenon could not be tracked by the instrument, which measures the water level only every 15 minutes.

Analysing seismic signals : a key to deciphering the event

Only seismometers could reveal the dynamics of the landslide and the associated tsunami, the closest of them being about 100 km away from the fjord. The analyses carried out by IPGP and ESOT members, along with their international collaborators, allowed for reconstructing the



(a) Masse déstabilisée (montagne en amont et glacier dans la vallée), (b) simulation numérique de la seiche montrant l'oscillation de l'eau perpendiculairement au fjord, (c) spectrogramme du signal sismique montrant l'onde monochromatique (fréquence ~10.88 mHz ou période ~92 s).

(a) Destabilised mass (mountain upstream and glacier in the valley), (b) numerical simulation of the seiche showing the oscillation of the water perpendicular to the fjord, (c) spectrogram of the seismic signal showing the monochromatic wave (frequency ~10.88 mHz or period ~92 s).

sismiques. Le volume de roches et de glace déplacé, comprenant la paroi rocheuse et la couverture glaciaire, est estimé à environ 25 millions de mètres cubes.

Un bourdonnement sismique mondial persistant

En quelques centaines de secondes, le signal sismique lié au tsunami se transforme en une onde stationnaire régulière, identifiée comme une "seiche", oscillant toutes les 92 secondes perpendiculairement à l'axe du fjord. Les analyses ont révélé que la période de 92 secondes était directement liée aux dimensions du fjord. L'onde ainsi générée a exercé une force horizontale répétée sur les parois du fjord, produisant une énergie sismique qui s'est propagée sous forme d'ondes de surface à l'échelle mondiale.

evolution of the landslide from the seismic signals. The volume of displaced rock and ice, including the rock face and the ice cover, is estimated to ~25 million cubic metres.

A persistent global seismic hum

Within a few hundred seconds, the seismic signal linked to the tsunami is transformed into a regular standing wave, identified as a 'seiche', oscillating every 92 seconds perpendicular to the axis of the fjord. The analyses revealed that the 92-second period is directly related to the dimensions of the fjord. The generated wave thus exerted a repeated horizontal force on the walls of the fjord, producing seismic energy that propagated in the form of surface waves on a global scale.



Pourquoi une durée aussi exceptionnelle ?

La persistance de la seiche pendant neuf jours est un phénomène inédit. Des simulations numériques menées par des membres de l'IPGP et leurs collaborateurs ont montré comment les vagues chaotiques générées par le tsunami se stabilisaient en une seiche régulière, soutenue par la géométrie unique du fjord Dickson qui limite la dispersion de l'énergie de l'onde dans l'océan. Les simulations ont été réalisées avec une résolution spatiale de 5 mètres, nécessitant une semaine de calcul, pour garantir une très faible dissipation numérique, indispensable pour modéliser avec précision la persistance de la seiche sur cette période exceptionnelle de neuf jours.

Vers une nouvelle compréhension des interactions entre climat et Terre solide

Le glissement de terrain est directement lié à l'amincissement du glacier, qui a perdu près de 30 mètres d'épaisseur au cours des dernières décennies, une conséquence directe du réchauffement climatique. Cet événement marque la première observation d'une seiche à dissipation lente générant un signal sismique mondial, démontrant ainsi comment le changement climatique peut déclencher des phénomènes naturels puissants et inattendus. Suite à cette étude, les auteurs ont identifié sur les images satellitaires cinq autres glissements de terrain dont un, postérieur, ayant produit un signal sismique persistant pendant sept jours. Ces travaux soulignent la nécessité d'une surveillance fine et continue combinant l'observation de la Terre solide (par sismologie et géodésie), de la surface (via l'imagerie satellitaire), des océans (avec les marégraphes) et de l'atmosphère (grâce aux infrasons). Elle met également en évidence le rôle essentiel des simulations avancées pour déchiffrer ces dynamiques complexes. Le glissement de terrain, le tsunami et la seiche du fjord Dickson illustrent l'interconnexion profonde des systèmes terrestres et climatiques, où l'atmosphère, les glaciers et les océans interagissent de manière globale et en cascade.

Why such an exceptional duration ?

The persistence of the seiche for nine days is an unprecedented phenomenon. Numerical simulations carried out by IPGP members and their colleagues showed how the chaotic waves generated by the tsunami stabilise into a regular seiche, supported by the unique geometry of Dickson Fjord, which limits the dispersion of the wave's energy into the ocean. The simulations were carried out with a spatial resolution of 5 metres, requiring a week of computation, to guarantee very low numerical dissipation, which is essential for accurately modelling the persistence of the seiche over this exceptional nine-day period.

Towards a new understanding of the interactions between climate and solid Earth

The landslide is directly linked to the thinning of the glacier, which has lost almost 30 metres in thickness over recent decades, a direct consequence of global warming. This event marks the first observation of a slowly dissipating seiche generating a global seismic signal, demonstrating how climate change can trigger powerful and unexpected natural phenomena. Following this study, the authors identified five other landslides on satellite images, including a later one that produced a seismic signal that persisted for seven days. This work highlights the need for detailed, continuous monitoring combining observations of the solid Earth (using seismology and geodesy), the surface (using satellite imagery), the oceans (using tide gauges) and the atmosphere (using infrasound). It also highlights the essential role of advanced simulations in deciphering these complex dynamics. The landslide, the tsunami and the Dickson Fjord seiche illustrate the profound interconnection of terrestrial and climatic systems, where the atmosphere, glaciers and oceans interact in a global and cascading manner.

Ref : Svennevig, K., Hicks, S. P., Forbriger, T., Lecocq, T., Widmer-Schmidrig, R., Mangeney, A., et al. (2024).

A rockslide-generated tsunami in a Greenland fjord rang Earth for 9 days. Science. <https://doi.org/10.1126/science.adm9247>.

Contact : Anne Mangeney | mangeney@ipgp.fr ; Claudio Satriano | satriano@ipgp.fr ; Antoine Lucas | lucas@ipgp.fr

#3

Une vue imprenable sur les entrailles de la Soufrière de Guadeloupe

A view into the interior of La Soufrière de Guadeloupe

Les volcans sont constitués d'un assemblage complexe de roches plus ou moins fracturées, de poches de liquide magmatique, de fluides hydrothermaux et de gaz aux compositions et aux propriétés physico-chimiques diverses, ce qui rend l'imagerie particulièrement compliquée. La tomographie sismique, qui exploite les tremblements de terre pour sonder les propriétés du milieu comme la vitesse sismique des ondes et la densité, requiert par exemple une activité sismique significative et bien contrainte, ainsi qu'un réseau de stations sismologiques couvrant une grande étendue spatiale pour imager en grande profondeur. Néanmoins, la résolution des images obtenues est limitée à quelques kilomètres, ce qui restreint son utilité pour des applications géologiques détaillées. Il existe donc peu d'études permettant de connaître avec précision la structure interne des volcans présents au niveau des arcs de subduction, comme celui des Petites Antilles.

Une méthode d'imagerie matricielle passive, mise au point par des chercheuses et chercheurs de l'Institut Langevin (CNRS/ESPCI Paris - PSL University) et de l'Institut de physique du globe de Paris (Université Paris Cité/CNRS), en collaboration avec l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe (IPGP), permet désormais de sonder les entrailles d'un volcan avec une résolution et une profondeur inégalées jusqu'ici. Pour y parvenir, un réseau dense de 76 géophones, qui captent en continu le bruit sismique induit par le vent, l'océan et l'activité humaine, a été déployé pour une durée de deux mois. Ce déploiement a permis de simuler une expérience de sismologie active. À partir de la corrélation du bruit sismique entre deux stations, il est possible d'obtenir la réponse impulsionnelle du milieu, comme si à un site se produisait une source sismique virtuelle que l'on enregistre au second capteur. À l'échelle du réseau dense de géophones, il est alors possible de simuler une source pour chaque site que l'on écoute à toutes les autres positions du réseau. Les ondes sismiques qui sont produites se propagent dans le milieu et sondent les différentes zones en se réfléchissant aux interfaces et hétérogénéités présentes dans le système magmatique. Les fronts d'ondes

Volcanoes are made up of a complex assemblage of more or less fractured rocks, pockets of magmatic liquid, hydrothermal fluids and gases with different compositions and physico-chemical properties, rendering their internal imaging particularly difficult. Seismic tomography, which uses earthquakes to probe properties of the medium such as seismic wave velocity and density, for example, requires significant, well-constrained seismic activity, as well as a network of seismological stations covering a large area to image at great depth. However, the resolution of the images obtained is limited to a few kilometers, which limits their usefulness for detailed geological applications. As a result, few studies have been carried out to gain precise knowledge of the internal structure of volcanoes in subduction arcs, such as those of the Lesser Antilles.

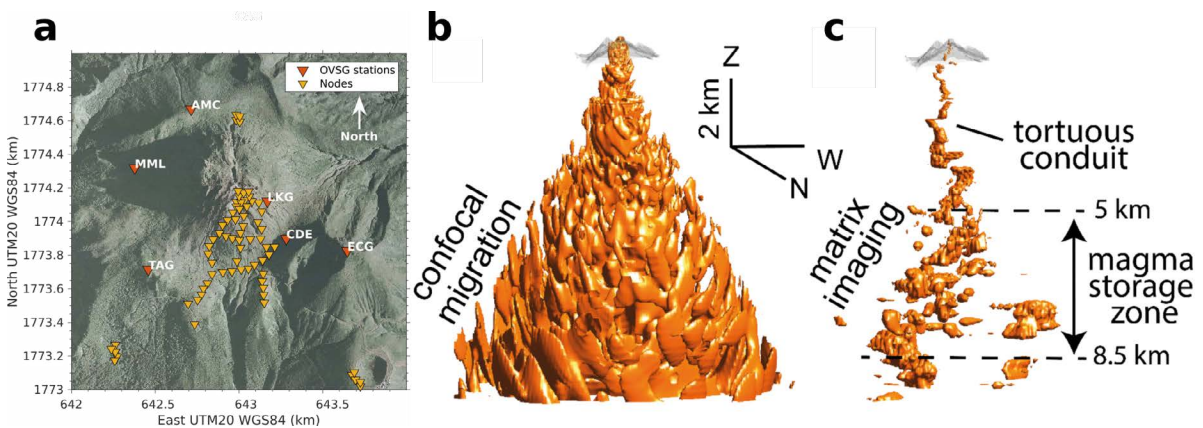
A passive matrix imaging technique developed by researchers at the Institut Langevin (CNRS/ESPCI Paris - PSL University) and the Institut de physique du globe de Paris (Université Paris Cité/CNRS), in collaboration with the Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe (IPGP), can now probe the interior of a volcano with unprecedented resolution and depth. To achieve this, a dense network of 76 geophones was deployed over a two-month period to continuously record seismic noise induced by wind, ocean, and human activity. This deployment was used to simulate an active seismology experiment. From the correlation of seismic noise between two stations, it is possible to obtain the impulse response of the environment as if virtual seismic sources were generated at one location and recorded at the second sensor. At the scale of the dense network of geophones, it is then possible to simulate a source for each location, which is then heard at all other locations in the network. The generated seismic waves propagate through the medium, probing different zones and reflecting on the interfaces and heterogeneities present in the magma system. The wavefronts passing through the various geological structures

traversant les différentes structures géologiques et les poches de gaz et de magma du volcan vont alors subir des distorsions qui vont perturber la focalisation de l'intensité sismique aux différents diffuseurs pour produire une imagerie confocale, à la manière d'une échographie médicale, qui est entièrement brouillée.

Dans cette étude, l'imagerie matricielle s'attache au principe de focalisation adaptative, sur le modèle de l'astronomie et l'utilisation de miroirs déformables dans un télescope pour re-focaliser l'intensité lumineuse et gommer l'effet de scintillement des étoiles. Après avoir construit la matrice de réflexion focalisée à partir des réponses impulsionnelles, il est possible d'avoir accès à toutes les informations de réflectivité du milieu. En utilisant par la suite l'effet mémoire d'une onde durant sa propagation, il est possible d'identifier les fronts d'ondes distordus qui ont traversé les mêmes hétérogénéités. En renversant temporellement ces distorsions communes, une loi de focalisation est obtenue, qui permet de gommer l'effet d'étalement de l'intensité sismique et de focaliser avec une résolution de l'ordre de la centaine de mètres sur un volume imagé allant jusqu'à 10 km de profondeur sur une largeur d'environ 15 km à la base du volume imagé. Les hétérogénéités de vitesse et de densité ne sont alors plus un obstacle et la structure interne du volcan est imagée.

and pockets of gas and magma in the volcano then undergo distortions that disrupt the focus of the seismic intensity at the various scatterers, producing a confocal image, similar to a medical ultrasound, that is completely blurred.

In this study, matrix imaging focuses on the principle of adaptive focusing, which is inspired by astronomy and the use of deformable mirrors in a telescope to refocus light intensity and eliminate the effect of star twinkling. After constructing the focused reflection matrix from the impulse responses, all the reflectivity information of the medium can be accessed. Using the memory effect of a wave as it propagates, distorted wavefronts can be identified, as they have passed through the same heterogeneities. By time-reversing these common distortions, a focusing law was obtained, which erases the spreading effect of the seismic intensity and allows to focus with a resolution of the order of a hundred meters on an imaged volume up to 10 km deep and about 15 km wide at the base of the imaged volume. Heterogeneities in velocity and density are no longer an obstacle and an image of the internal structure of the volcano is achieved.



(a) Carte du réseau dense sismologique avec les géophones temporaires (orange) et les stations permanentes du réseau de l'OVSG (rouge) utilisé pour l'imagerie matricielle de la Soufrière de Guadeloupe. (b) Vue tri-dimensionnelle du volcan, obtenue par une migration confocale de la matrice de réflexion. L'image obtenue est totalement brouillée par les distorsions des ondes sismiques induites par les hétérogénéités à l'intérieur du volcan. (c) Image matricielle du volcan obtenue par apprentissage des lois de focalisation compensant les hétérogénéités de ce dernier. Jusqu'à 5 km, l'image révèle le conduit tortueux de la Soufrière occupé par des gaz et des fluides hydrothermaux. Au-delà, une zone de stockage du magma plus ou moins éruptible, est mise en lumière avec un arrangement complexe de lentilles de magma horizontales connectées les unes aux autres par des conduits subverticaux.

(a) Map of the dense seismic network with temporary geophones (orange) and permanent stations from the OVSG network (red) used for matrix imaging of La Soufrière de Guadeloupe. (b) Three-dimensional view of the volcano, obtained by confocal migration of the reflection matrix. The resulting image is completely blurred by seismic wave distortions caused by heterogeneities within the volcano. (c) Matrix image of the volcano obtained through the learning of focusing laws that compensate for these heterogeneities. Up to 5 km depth, the image reveals the tortuous conduit of La Soufrière, filled with gas and hydrothermal fluids. Beyond that depth, a magma storage zone, more or less prone to eruption, is highlighted, showing a complex arrangement of horizontal magma lenses connected by subvertical conduits.



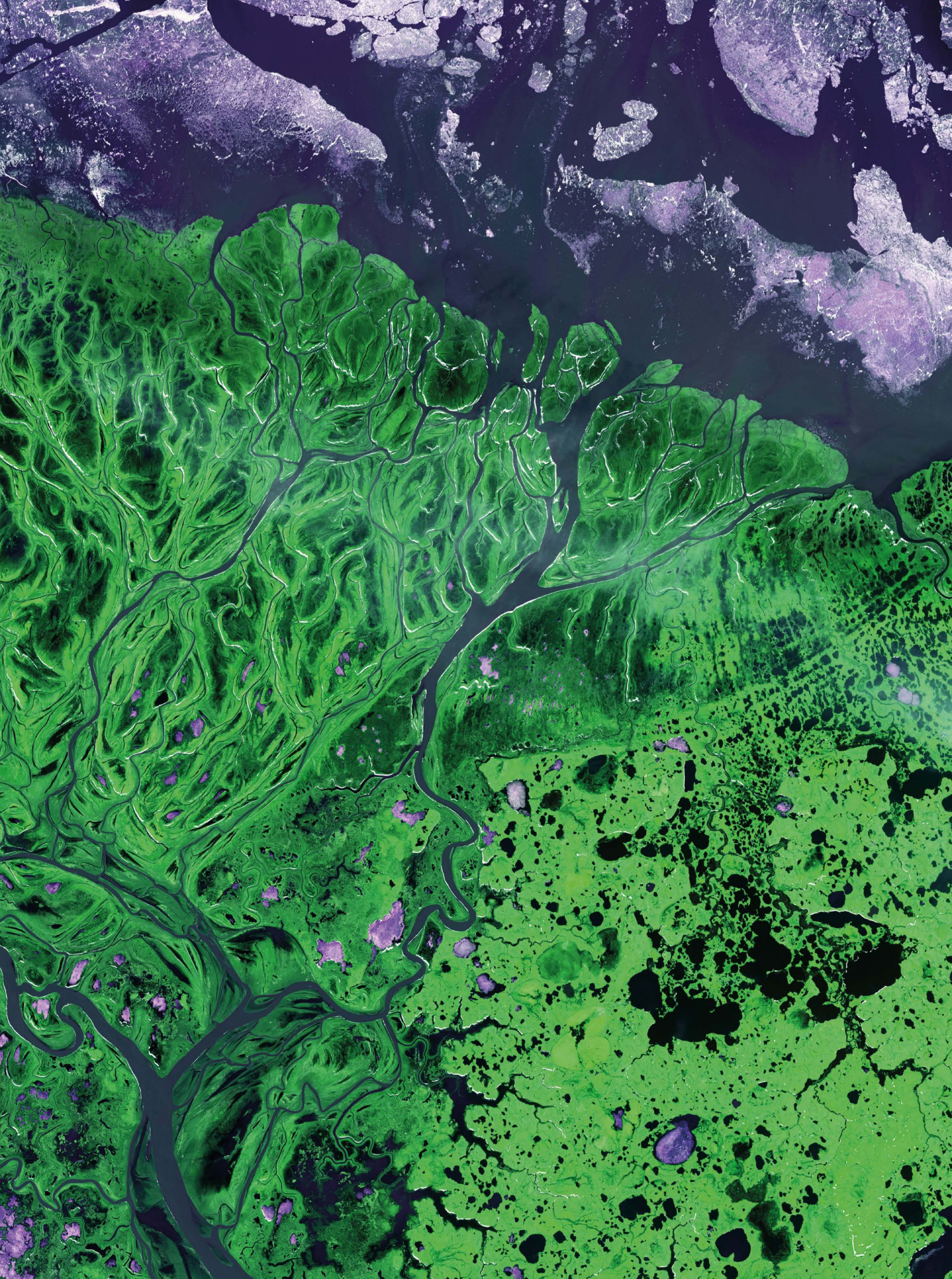
Ces résultats ont été obtenus sur le volcan de La Soufrière de Guadeloupe. Ils révèlent la forme tortueuse de la cheminée du volcan dans sa partie supérieure contenant des gaz et des fluides hydrothermaux. Surtout, ils confirment l'existence d'une grande zone de stockage de magma en profondeur dont une partie, actuellement non quantifiable, est potentiellement éruptible, ainsi que sa structuration en un réseau de lentilles de magma horizontales connectées entre elles par des conduits magmatiques subverticaux. En plus de confirmer certains modèles géologiques conceptuels proposés dans la littérature, de telles images offrent un point de vue unique sur les volcans, à même de révolutionner le champ de la volcanologie. Cette technique d'imagerie matricielle passive peut s'appliquer à n'importe quel volcan pourvu qu'il y soit déployé un réseau dense de géophones. À terme, ces travaux pourront être réitérés au fil du temps pour étudier la dynamique interne du système volcanique et offrir, en corrélation avec d'autres méthodes, une nouvelle observable puissante et prometteuse pour la volcanologie et l'anticipation des éruptions.

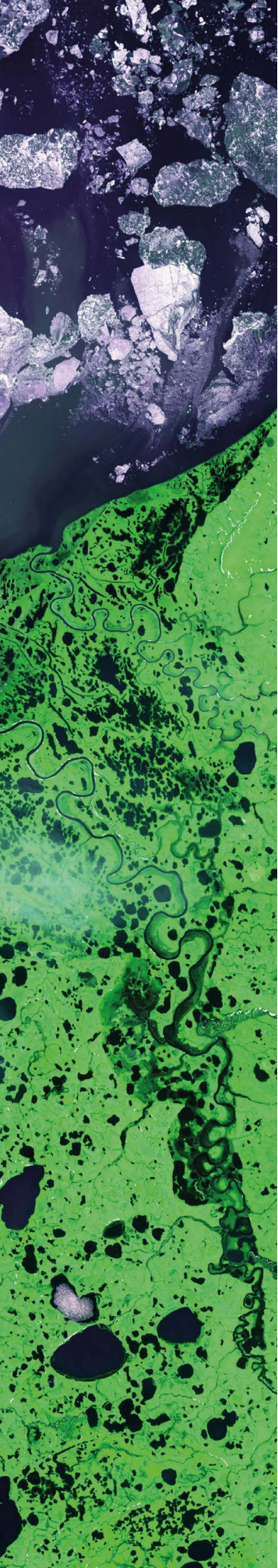
These results were obtained at La Soufrière volcano in Guadeloupe. They reveal the tortuous shape of the volcano chimney in its upper part, which contains gases and hydrothermal fluids. Above all, they confirm the existence of a large magma storage zone at depth, part of which - currently unquantifiable - is potentially eruptible, and its structuring into a network of horizontal magma lenses connected by subvertical magmatic conduits. Such images not only confirm certain conceptual geological models proposed in the literature but they also provide a unique perspective on volcanoes that has the potential to revolutionize the field of volcanology. This passive matrix imaging technique can be applied to any volcano as long as a dense network of geophones is deployed. Ultimately, this work can be repeated over time to study the internal dynamics of the volcanic system and, in correlation with other methods, to provide a powerful and promising new observable for volcanology and eruption forecasting.

Ref : E. Giraudat, A. Burtin, A. Le Ber, M. Fink, J-C. Komorowski & A. Aubry. **Matrix imaging as a tool for high-resolution monitoring of deep volcanic plumbing systems with seismic noise.** *Commun Earth Environ* 5, 509 (2024). DOI :10.1038/s43247-024-01659-2

Contacts : Arnaud Burtin | burtin@ipgp.fr ; Jean-Christophe Komorowski | komorowski@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.

Trois études récentes de l'IPGP illustrent la diversité et la profondeur de la recherche sur le Système Terre. En Guadeloupe, des campagnes de terrain révèlent une élimination accélérée des aérosols par les pluies tropicales, défiant les modèles climatiques. Un modèle innovant montre comment les plantes structurent la chimie des sols et influencent durablement les rivières. Enfin, l'analyse d'azote isotopique dans des sédiments archéens révèle l'émergence précoce de la photosynthèse oxygénique, bien avant la Grande Oxydation. Ensemble, ces travaux soulignent l'importance des interactions entre biosphère, géosphère et atmosphère dans l'évolution de notre planète.

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.

Three recent IPGP studies illustrate the breadth and depth of Earth System research. In Guadeloupe, field campaigns revealed an unexpectedly rapid removal of aerosols by tropical rainfall, challenging current climate models. A novel model demonstrated how plants shape soil chemistry and exert long-term influence on river systems. Lastly, isotopic nitrogen analysis in Archean sediments pointed to the early emergence of oxygenic photosynthesis, well before the Great Oxidation Event. Together, these studies highlight the critical interplay between the biosphere, geosphere, and atmosphere in the evolution of our planet.

#1

Une signature de la vie dans la chimie des sols et des rivières ? Is there a signature of life in the chemistry of soils and rivers ?

Une équipe de recherche internationale, réunissant des scientifiques de l'IPGP (équipe G2E – Géochimie des enveloppes externes) et de l'Université de l'Illinois, propose un nouveau modèle qui met en lumière le rôle clé de l'activité biologique dans l'altération des roches. Cette modélisation révèle comment les plantes influencent la distribution verticale des éléments chimiques dans les sols et modifient durablement la composition des eaux fluviales.

Les plantes jouent un rôle bien plus actif qu'on ne l'imaginait dans la dynamique de l'altération chimique des roches. Elles ne se contentent pas d'absorber passivement l'eau et les nutriments nécessaires à leur croissance : elles modifient en profondeur la manière dont l'eau interagit avec les minéraux de la subsurface, influençant directement les flux d'éléments dissous exportés par les rivières.

Un modèle vertical unidimensionnel, développé récemment, permet de simuler ces interactions fines entre biologie, géochimie et hydrologie. Il intègre les prélèvements racinaires d'eau et de nutriments issus des roches altérées, ainsi que le recyclage partiel des éléments via la décomposition de la litière dans les horizons superficiels du sol. Ce modèle illustre la manière dont les plantes "organisent" la distribution verticale des éléments chimiques en fonction de leur valeur nutritive ou de leur toxicité : ainsi, des nutriments comme le potassium tendent à s'accumuler en surface, tandis que des éléments non essentiels ou potentiellement toxiques, comme le sodium ou l'aluminium, migrent en profondeur.

Cette répartition chimique différenciée peut expliquer la formation de certains types d'argiles spécifiques à chaque horizon du sol. Le modèle offre également une grille de lecture innovante pour comprendre pourquoi la composition chimique des rivières reste relativement stable, même en période de fortes variations de débit. En effet, la transpiration foliaire modifie profondément le bilan hydrique des bassins versants et, par conséquent, les flux de solutés exportés.

An international research team, bringing together scientists from IPGP (G2E team – Geo-chemistry of External Envelopes) and the University of Illinois, has developed a new model that highlights the key role of biological activity in rock weathering. Their work reveals how plants influence the vertical distribution of chemical elements in soils and durably alter river water composition.

Plants play a far more active role in chemical weathering than previously thought. Beyond passively absorbing water and nutrients, they profoundly modify how water interacts with subsurface minerals, directly impacting the flux of dissolved elements exported by rivers.

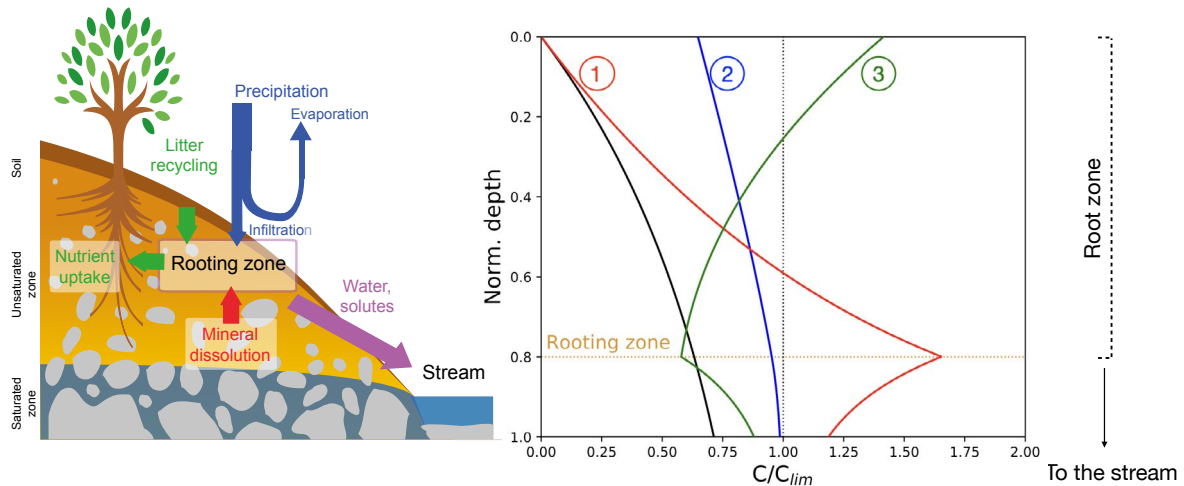
A recently developed one-dimensional vertical model simulates these fine-scale interactions between biology, geochemistry, and hydrology. It incorporates root uptake of water and nutrients from weathered rocks, as well as partial recycling of elements through the re-dissolution of leaf litter in the upper soil horizons. This model shows how plants "organize" the vertical distribution of chemical elements depending on their nutritional value or toxicity. For example, nutrients like potassium tend to accumulate near the surface, while non-essential or potentially toxic elements such as sodium and aluminum migrate to deeper layers.

This differentiated chemical profile can help explain the formation of specific types of clays in distinct soil horizons. The model also provides a new framework to understand why river chemistry often remains relatively constant despite significant changes in discharge. Leaf transpiration significantly alters the water balance in catchments, thereby influencing the export of dissolved solutes.



Ce travail propose une avancée majeure en fournissant une base mécanistique pour intégrer l'activité racinaire dans les modèles de transport réactif. Une clé essentielle pour mieux anticiper l'évolution des sols, des paysages et des réponses hydrochimiques de la zone critique face au changement climatique et aux événements extrêmes.

This work represents a major step forward, offering a mechanistic basis for integrating root-zone activity into reactive transport models. It provides a crucial tool to better understand the formation and evolution of soils and landscapes, as well as the hydrochemical responses of the critical zone to climate change and extreme events.



Effets de la demande en eau et en nutriments par les plantes sur la chimie de l'eau de subsurface. À gauche, schéma indiquant les processus pris en compte dans le modèle. À droite, les profils de profondeur de la concentration normalisée en solutés sont montrés pour une variété de comportements allant de l'exclusion (élément « toxique », en rouge, courbe 1) à un nutriment (absorption passive, en bleu, courbe 2 ; et nutriment activement absorbé, en vert, courbe 3). On suppose ici que le recyclage des éléments par dissolution de la litière est total et que la transpiration des feuilles correspond à 80 % des précipitations. Un résultat obtenu sans effet des plantes (courbe noire) est indiqué pour comparaison. Dans tous les cas, l'effet des plantes cesse lorsque l'eau pénètre sous la zone d'enracinement, dans une couche qui peut être considérée comme un aquifère (zone saturée).

Effects of plant water and nutrient demand on subsurface pore water chemistry. Left : sketch of the main processes taken into account in the model. Right : depth profiles of solute normalized concentration are shown for a variety of behavior ranging from exclusion ("toxic" element, in red, curve 1) to a nutrient (passive uptake, in blue, curve 2 ; and nutrient actively taken up, in green, curve 3). Recycling of the elements by litter dissolution is assumed here to be full, and leaf transpiration is 80 % of rainfall. The result omitting the effects of plants (black curve) is included as a reference point. In all cases, the effect of plants ceases as water penetrates below the rooting zone, in a layer that can be thought as an aquifer (saturated zone).

Ref : Druhan, J. L., & Bouchez, J. (2024). **Ecological regulation of chemical weathering recorded in rivers.**

Earth and Planetary Science Letters, 641, 118800.

Contacts : Julien Bouchez | bouchez@ipgp.fr

#2

Quand l'azote révèle les prémices de la présence de l'oxygène sur Terre

When nitrogen reveals the earliest signs of oxygen on Earth

Une étude menée par une équipe de l'IPGP sur des sédiments vieux de 2,68 milliards d'années révèle que la photosynthèse oxygénique – à l'origine de l'oxygène atmosphérique – était déjà active bien avant la Grande Oxydation, transformant en profondeur le cycle de l'azote sur Terre.

Les archives géochimiques conservent les indices d'un passé enfoui, et parfois, ce sont les isotopes d'un élément aussi discret que l'azote qui en disent long. Une récente étude menée par une équipe de l'IPGP met en lumière des variations séculaires de la composition isotopique de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) dans des roches sédimentaires âgées de 2,68 milliards d'années (Formation de Serra Sul, Brésil), indiquant une activité de la photosynthèse oxygénique dès 2,7 milliards d'années (Ga), soit environ 200 millions d'années avant que l'oxygène ne commence à s'accumuler dans l'atmosphère.

Cette précocité pose une question essentielle : comment l'oxygène pouvait-il être produit dans un environnement encore dépourvu d'oxygène libre ? La réponse réside dans un cycle de l'oxygène dit *cryptique*, dans lequel l'oxygène généré était immédiatement consommé par des réactions chimiques, ne laissant que des traces indirectes de son passage. L'analyse du $\delta^{15}\text{N}$ permet précisément d'identifier ces métabolismes dépendants de l'oxygène, en particulier l'oxydation de l'ammonium, une transformation qui requiert impérativement du dioxygène.

Les mesures isotopiques ont été réalisées au laboratoire de géochimie des isotopes stables de l'IPGP, grâce à une ligne à vide historique datant de la création du laboratoire dans les années 1970. Combinées à d'autres données, elles révèlent à un bouleversement dans notre compréhension du cycle biogéochimique de l'azote à cette époque, conséquence directe de l'émergence d'un métabolisme oxydatif.

Cette étude éclaire une étape clé de l'histoire de la Terre : la mise en route de la photosynthèse oxygénique à une époque où son empreinte était encore subtile, mais déjà déterminante. Elle marque l'un des premiers jalons vers l'oxygénation progressive de la surface terrestre.

A study led by a team from IPGP on 2.68-billion-year-old sediments reveals that oxygenic photosynthesis – the process responsible for producing atmospheric oxygen – was already active well before the Great Oxidation Event, profoundly transforming Earth's nitrogen cycle.

Geochemical archives preserve traces of ancient Earth, and sometimes, isotopes of a subtle element like nitrogen can tell a powerful story. A recent study by a team at IPGP highlights secular variations in the isotopic composition of nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) in sedimentary rocks dated to 2.68 billion years ago (Serra Sul Formation, Brazil), pointing to the presence of oxygenic photosynthesis as early as 2.7 billion years ago – approximately 200 million years before oxygen began to accumulate in the atmosphere.

This early onset raises a key question: how could oxygen have been produced in an environment that was still anoxic? The answer likely lies in a so-called *cryptic* oxygen cycle, in which the oxygen produced was rapidly and completely consumed by chemical reactions, leaving only indirect evidence of its presence. The $\delta^{15}\text{N}$ signal can reveal such processes, particularly the oxidation of ammonium – a metabolic pathway that is strictly oxygen-dependent.

The isotopic measurements were carried out at the IPGP's Stable Isotope Geochemistry Laboratory, using a vacuum line that dates back to the lab's founding in the 1970s. Combined with previous data, these new results provide strong evidence for a major shift in the biogeochemical nitrogen cycle at that time, driven by the onset of ammonium oxidation.

This study sheds light on a pivotal chapter in Earth's history: the emergence of oxygenic photosynthesis at a time when its footprint was still subtle, yet already transformative. It marks one of the earliest milestones in the progressive oxygenation of Earth's surface.

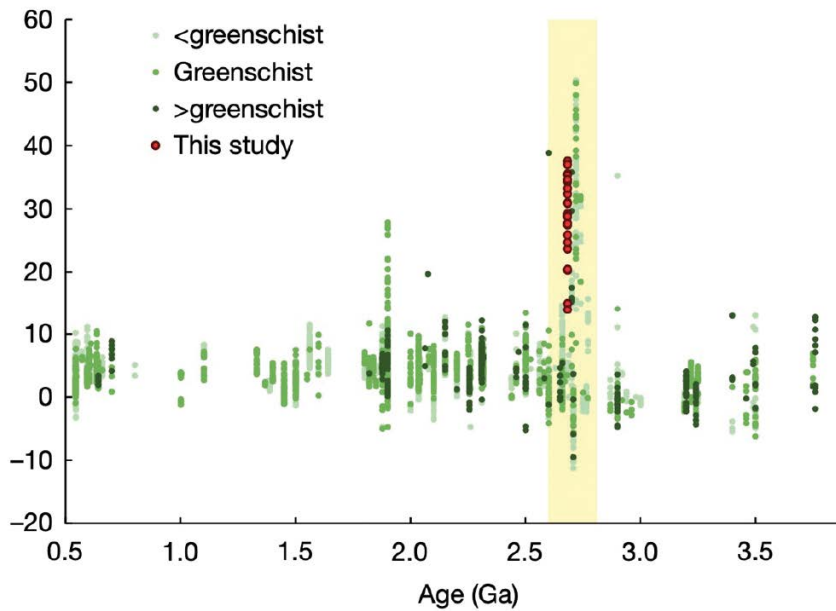


Figure montrant les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ mesurées dans les roches sédimentaires au cours des temps géologiques, et montrant la période de forte variabilité entre 2,6 et 2,8 Ga (extrait de la figure 1 de Pellerin *et al.*, 2024).

D¹⁵N values in sedimentary rocks through geological time showing the extreme variability in the 2.6 to 2.8 Ga interval (figure 1 from Pellerin *et al.*, 2024).



Illustration du travail sous ligne à vide nécessaire à la mesure des compositions isotopiques de l'azote dans les roches sédimentaires de cette étude. © Dars&Papilleau

Illustration of the vacuum line work required to measure the nitrogen isotopic compositions in the sedimentary rocks of this study.

Ref : Pellerin, A., Thomazo, C., Ader, M., Rossignol, C., Rego, E. S., Busigny, V., & Philippot, P. (2024). **Neoproterozoic oxygen-based nitrogen cycle en route to the Great Oxidation Event.**

Nature. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07842-x>

Contact : Magali Ader | ader@ipgp.fr ; Vincent Busigny | busigny@ipgp.fr

#3

Pluie tropicale et poussières lointaines : quand les aérosols tombent plus vite que prévu

Tropical rain and distant dust: when aerosols fall faster than expected

Dans les Caraïbes, les scientifiques de l'IPGP révèlent une dynamique atmosphérique inattendue : les aérosols, ces particules suspendues dans l'air, sont rapidement lessivés par les pluies tropicales, contredisant les modèles classiques. Une découverte qui illustre la pertinence de la recherche de terrain menée par les équipes de l'Institut.

Dans les couches basses de l'atmosphère, d'invisibles voyageurs sillonnent le ciel : les aérosols. Composés de sel marin, de poussières sahariennes, de cendres volcaniques, de pollens ou encore de particules issues des activités humaines, ces micro-particules jouent un rôle majeur dans de nombreux processus atmosphériques. Leur transport, leur concentration et leur dépôt au sol influencent la qualité de l'air, le climat régional, mais aussi la fertilité des sols. Jusqu'à récemment, les modèles de prévision de leur comportement indiquaient une persistance importante de ces particules dans l'air, avec un dépôt plutôt lent, surtout par voie sèche.

Mais une étude menée par les équipes de l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP), en collaboration avec ses partenaires antillais, vient bousculer cette vision établie. Pendant 14 mois, les chercheuses et chercheurs ont réalisé une campagne de mesures inédite en Guadeloupe, au cœur de l'arc des Petites Antilles. Leur objectif : mieux comprendre le lien entre les concentrations d'aérosols atmosphériques en suspension et les quantités réellement déposées au sol, qu'il s'agisse de dépôts secs ou de dépôts humides liés aux précipitations.

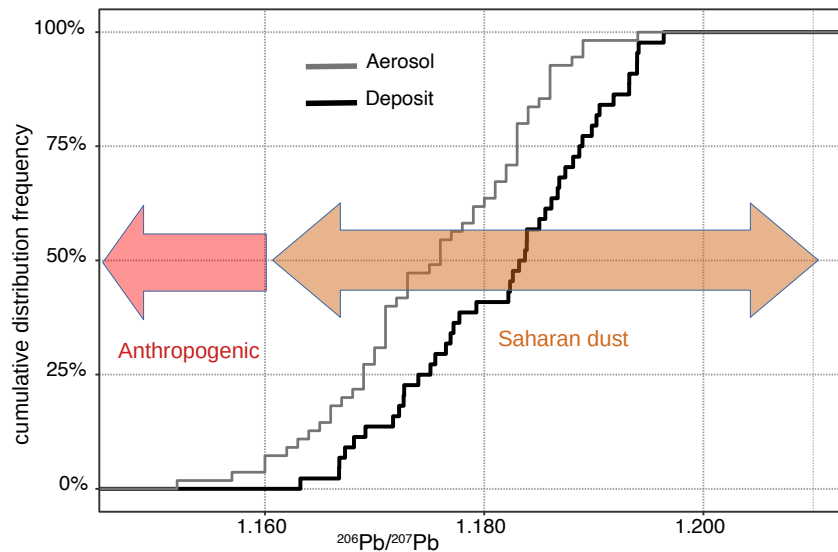
Les résultats, publiés récemment dans le *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, montrent que dans ce contexte insulaire tropical, les aérosols sont bien moins persistants qu'on ne le pensait. Les chercheurs ont en effet démontré que les flux de dépôts atmosphériques sont majoritairement dus à un lessivage rapide par la pluie. Ce phénomène de "dépôt humide" agit très efficacement et expulse rapidement les particules de l'atmosphère, limitant leur temps de résidence dans les basses couches. Résultat : les concentrations mesurées près du sol sont étonnamment faibles, malgré un apport constant de poussières venues de l'océan Atlantique ou du continent africain.

In the Caribbean, scientists from the IPGP reveal an unexpected atmospheric dynamic: aerosols, those tiny particles suspended in the air, are quickly washed out by tropical rainfall, contradicting standard models. A discovery that highlights the value of field research conducted by the Institute's teams.

In the lower layers of the atmosphere, invisible travelers drift across the sky: aerosols. Composed of sea salt, Saharan dust, volcanic ash, pollen, or particles from human activities, these micro-particles play a major role in numerous atmospheric processes. Their transport, concentration, and deposition influence air quality, regional climate, and even soil fertility. Until recently, models predicting their behavior suggested that aerosols persist in the atmosphere for extended periods, with relatively slow deposition—especially via dry processes.

But a study led by the teams at the Institut de physique du globe de Paris (IPGP), in collaboration with local Caribbean partners, is challenging this established understanding. Over a period of 14 months, researchers carried out an unprecedented measurement campaign in Guadeloupe, in the heart of the Lesser Antilles arc. Their goal: to better understand the relationship between atmospheric aerosol concentrations and their actual deposition on the ground, whether by dry settling or wet scavenging through rainfall.

The results, recently published in the *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, reveal that in this tropical island context, aerosols are far less persistent than expected. The scientists demonstrated that atmospheric deposition fluxes are predominantly governed by rapid removal via rainfall. This "wet deposition" mechanism is highly effective, quickly clearing aerosols from the lower atmosphere and resulting in surprisingly low near-surface concentrations—even in a region regularly exposed to dust from the Atlantic and the African continent.



Distributions cumulée comparée des rapports isotopiques du plomb $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ pour les échantillons d'aérosols et de dépôts. Les rapports isotopiques du plomb des sources anthropiques varient de 1,10 à 1,16, tandis que ceux de la source saharienne crustale varient de 1,16 à 1,22. Le rapport $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ dans la distribution des échantillons d'aérosols est moins radiogénique que dans la distribution des échantillons de dépôts totaux, et donc plus anthropique. Ce résultat pourrait être dû à une vitesse de dépôt et à un rapport de piégeage par les pluies plus faibles pour le plomb anthropique, dont la fraction en mode fin est plus importante que le plomb naturel. Cette différence pourrait également être attribuée à l'hétérogénéité verticale de la teneur en plomb des aérosols, avec, dans la basse couche atmosphérique, un enrichissement en plomb anthropique émis localement.

Cumulative distributions of lead isotope ratios $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ for aerosol and deposition samples. The lead isotope ratios of anthropogenic sources range from 1.10 to 1.16 while those from the crustal Saharan source range from 1.16 to 1.22. The $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ratio in the distribution of aerosol samples is less radiogenic than in the distribution of the total deposition samples, and thus more anthropogenic. This result could be due to a lower deposition velocity and scavenging ratio for anthropogenic lead, which has a larger fraction in fine mode than natural lead. This difference could also be attributed to the vertical heterogeneity of lead in aerosols, with an enrichment in anthropogenic lead locally emitted in the lower atmospheric layer.

Cette découverte met en lumière des processus encore mal connus de la dynamique atmosphérique en région tropicale et souligne l'importance des études in situ pour affiner nos modèles climatiques. Elle témoigne également du savoir-faire des équipes de l'IPGP, capables de déployer des dispositifs de mesure complexes dans des environnements contraignants, et de conduire des analyses d'éléments très peu abondant et dans des conditions de propreté très exigeantes que permet la plateforme analytique PARI de l'IPGP-UPC.

En explorant les chemins que parcourent les poussières dans l'atmosphère, cette recherche éclaire aussi les enjeux liés aux interactions entre climat, environnement et santé publique dans les régions insulaires. Elle démontre, une fois de plus, l'engagement de l'IPGP pour une science de terrain rigoureuse et innovante, au service de la compréhension fine de notre planète.

This discovery sheds new light on poorly understood processes in tropical atmospheric dynamics and underscores the value of in situ studies for refining climate models. It also highlights the expertise of IPGP teams, who are capable of deploying complex measurement systems in challenging environments and conducting analyses at very low levels in the extremely clean conditions that the PARI IPGP-UPC analytical platform allows us to maintain.

By tracing the journey of atmospheric dust, this research also addresses key issues at the intersection of climate, environment, and public health in island regions. Once again, it demonstrates IPGP's commitment to rigorous, innovative field science dedicated to a deeper understanding of our planet.

Ref : Xu-Yang, Y., Losno, R., Dessert, C., Monna, F., Mahowald, N. M., & Tharaud, M. (2025). **Atmospheric aerosols versus total atmospheric deposition in Guadeloupe (Lesser Antilles): Composition, concentration, and flux.** *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 130, e2024JD042682. <https://doi.org/10.1029/2024JD042682>

Contact : Rémi Losno | losno@ipgp.fr ; Céline Dessert | dessert@ipgp.fr ; Mickael Tharaud | tharaud@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 s'avère essentielle pour comprendre comment ils ont pu contrôler à la fois 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 géochimie, la cosmochimie, la géophysique, la géobiologie et l'astrophysique peuvent travailler ensemble sur le décryptage de ces questions fondamentales.

En 2024, trois travaux significatifs se distinguent dans le cadre du thème Origines. Une étude de l'IPGP, en collaboration avec l'Université d'Oslo, montre que le dégazage de l'hélium dans les océans magmatiques des jeunes planètes est fortement amplifié par la présence de CO_2 , ce qui éclaire la formation des premières atmosphères planétaires. Une autre étude remet en question l'âge des anneaux de Saturne, suggérant qu'ils pourraient dater de la formation du Système solaire, leur apparente jeunesse étant liée à un mécanisme naturel d'auto-nettoyage. Enfin, l'IPGP a contribué à la calibration de l'instrument MAJIS à bord de la mission JUICE, qui étudiera les lunes glacées de Jupiter en quête de conditions favorables à la vie.

The planets of the Solar System exhibit highly diverse compositions and structures, whose origins remain the subject of ongoing debate. Studying the primordial processes 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, geochemistry, cosmochemistry, geophysics, geobiology, and astrophysics—can work together to unravel these fundamental questions.

In 2024, three major research efforts stood out under the theme Origins. A study conducted by the IPGP in collaboration with the University of Oslo showed that helium degassing in the magma oceans of young planets is significantly enhanced by the presence of CO_2 , shedding new light on the formation of early planetary atmospheres. Another study challenged the presumed age of Saturn's rings, suggesting they may date back to the formation of the Solar System, with their apparent youth explained by a natural self-cleaning process. Finally, the IPGP contributed to the calibration of the MAJIS instrument aboard the JUICE mission, which will explore Jupiter's icy moons in the search for life-friendly conditions.

#1

Mise en lumière de l'importance du CO₂ dans le dégazage de l'hélium au sein des océans magmatiques des jeunes planètes

Highlight of the importance of CO₂ in the degassing of helium in the magma oceans of young planets

Des chercheurs de l'IPGP et de l'Université d'Oslo révèlent que la perte d'éléments volatils lors du dégazage d'un océan magmatique, notamment le carbone et l'hélium, est étroitement liée à la fois à la pression, à la température et à la composition de la matière fondue. Leurs simulations montrent que le CO₂ favorise la volatilisation de l'hélium.

Suite à l'impact géant qui a conduit à la formation de la Lune, la Terre s'est condensée sous la forme d'une planète en fusion, entourée par un disque protolunaire. Une grande partie des éléments volatils se sont alors retrouvés piégés et comprimés avec les éléments plus lourds au sein d'un océan magmatique global. Lorsque celui-ci s'est refroidi et a dégazé, ces éléments volatils ont joué un rôle déterminant dans la formation de l'atmosphère secondaire de la Terre.

À l'aide de calculs de dynamique moléculaire complexes, une équipe de chercheurs de l'IPGP et de l'Université d'Oslo a simulé le comportement de deux éléments volatils majeurs, le carbone et l'hélium, dans une pyrolite fondue (roche synthétique représentative de la composition du manteau terrestre silicaté), enrichie en CO₂ et en hélium. Leurs résultats révèlent que la perte de volatils est étroitement liée à la fois à la pression, à la température et à la composition de la matière fondue. Au-dessus d'une pression d'environ 25 kbar, la matière fondue forme un réseau polymérisé en continu, dissolvant entièrement le carbone et l'hélium. Toutefois, lorsque la pression diminue, des bulles nanoscopiques se forment dans le liquide, agissant comme des réservoirs pour les espèces gazeuses vaporisées à partir de la matière fondue.

Ces simulations montrent que le CO₂ améliore le dégazage de l'hélium en stabilisant la formation de nanobulles et en augmentant leur efficacité. La présence de carbone rend la matière fondue moins dense, ce qui facilite la formation de canaux par lesquels l'hélium peut s'échapper plus facilement. En se vaporisant, le carbone forme également des voies susceptibles d'entraîner des

Researchers at the IPGP and the University of Oslo have revealed that the loss of volatile elements during the degassing of a magma ocean, in particular carbon and helium, is closely linked to the pressure, temperature and composition of the molten material. Their simulations show that CO₂ favours the volatilisation of helium.

A collaboration between IPGP and the University of Oslo—partners within CircleU—offers new insights into the evolution of the early Earth's atmosphere. Following the giant impact that led to the formation of the Moon, the Earth condensed as a hot molten sphere in the center of the protolunar disk. Volatile elements were trapped and condensed with heavier elements into a global magma ocean. As this ocean cooled and degassed, these volatiles played a crucial role in sculpting Earth's secondary atmosphere.

Using state-of-the-art first-principles molecular dynamics calculations, the team simulated the behavior of carbon and helium in a pyrolite melt representative of the bulk silicate Earth composition, enriched with CO₂ and helium. Their findings reveal that the loss of volatiles is intricately linked to the pressure, temperature, and composition of the melt. Above approximately 25 kbar pressure, the melt forms a continuously polymerized network, fully dissolving both carbon and helium. However, as pressure decreases, nanoscale cavities—nanobubbles—form within the liquid, acting as reservoirs for gas-like species vaporized from the melt.

These simulations show that CO₂ enhances helium degassing by stabilizing the formation of nanobubbles and increasing their efficacy. The presence of carbon makes the melt less dense, facilitating the formation of channels through which helium can escape more readily. As carbon vaporizes, it not only assists in helium escape but also forms pathways



pertes importantes de substances volatiles dans l'océan magmatique, laissant supposer que l'atmosphère de la Terre primitive était plus riche en carbone et en gaz nobles, mais aussi nettement plus chaude et plus épaisse que ce que l'on estimait jusqu'à présent.

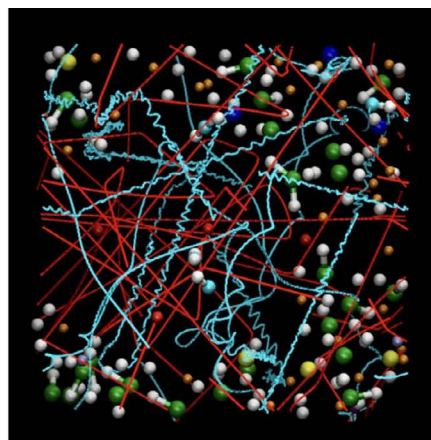
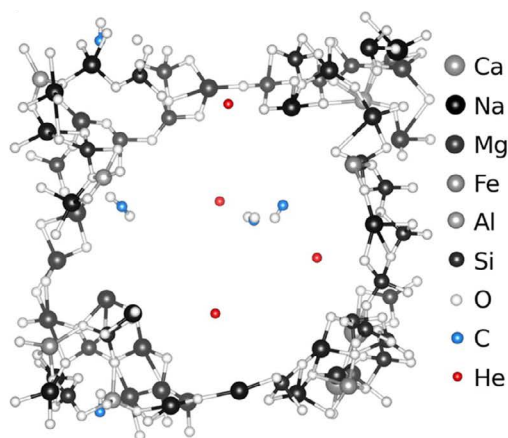
Les implications de ces travaux s'étendent aux exoplanètes en orbite autour d'étoiles dont la teneur en carbone varie. Les exoplanètes gravitant autour d'étoiles riches en carbone pourraient connaître un dégazage important en raison de la prédominance de la vapeur carbonée, se traduisant par des atmosphères plus épaisses et des intérieurs appauvris en éléments volatils. À l'inverse, les planètes en orbite autour d'étoiles pauvres en carbone présenteraient un dégazage moins important, ce qui se traduirait par des atmosphères plus minces et des intérieurs riches en volatils, à même de se solidifier plus rapidement.

Ainsi, les corps planétaires développant une croûte de flottaison au début de leur histoire de refroidissement encapsuleraient leurs volatils à l'intérieur, influençant profondément les processus géochimiques et l'évolution de ces planètes. Cette étude ne fait pas seulement progresser notre compréhension de la formation des planètes, elle met également en évidence l'interaction complexe des éléments dans les conditions extrêmes qui façonnent les atmosphères et les surfaces des jeunes planètes dans tout l'univers.

that could have led to significant volatile losses from the magma ocean. This suggests an early Earth atmosphere richer in carbon and noble gases, and significantly hotter and thicker than previously estimated.

The implications of this research extend beyond our planet to molten exoplanets orbiting stars with varying carbon levels. Exoplanets around carbon-rich stars are likely to experience elevated degassing due to the prevalence of carbon-bearing vapor, resulting in thicker atmospheres and volatile-depleted interiors. Conversely, those orbiting carbon-poor stars would exhibit less degassing, leading to thinner atmospheres and volatile-rich interiors, potentially solidifying more quickly.

Planetary bodies forming a flotation crust early in their cooling histories would encapsulate their volatiles within their interior, profoundly influencing geochemical processes and planetary evolution. This study advances our understanding of planetary formation and highlights the intricate interplay of elements under extreme conditions, shaping the atmospheres and surfaces of young planets across the universe.



Images représentatives de la simulation, montrant une bulle nanoscopique peuplée de CO, de CO₂ et d'He (gauche). Exemples de trajectoires d'un atome d'hélium (ligne rouge droite) et d'un atome de carbone (ligne bleue oscillante) sur la durée d'une simulation (droite). Les espèces volatiles traversent la longueur de la bulle, échangent et interagissent avec les atomes de la phase fondue.

Representative snapshots of the simulation showing a nanobubble populated by CO, CO₂, and He (left panel). Example trajectories of a helium atom (straight red line) and a carbon atom (oscillating blue line) over the length of one simulation (right panel). The volatile species traverse the length of the bubble and exchange and interact with atoms in the melt phase.

Ref : A.H. Davis & R. Caracas, **Degassing of CO₂ triggers large-scale loss of helium from magma oceans**, *Communications Earth and Environment*, 2024, 5. DOI : 10.1038/s43247-024-01509-1

Contact : Razvan Caracas | caracas@ipgp.fr

#2

Une nouvelle perspective sur l'âge des anneaux de Saturne

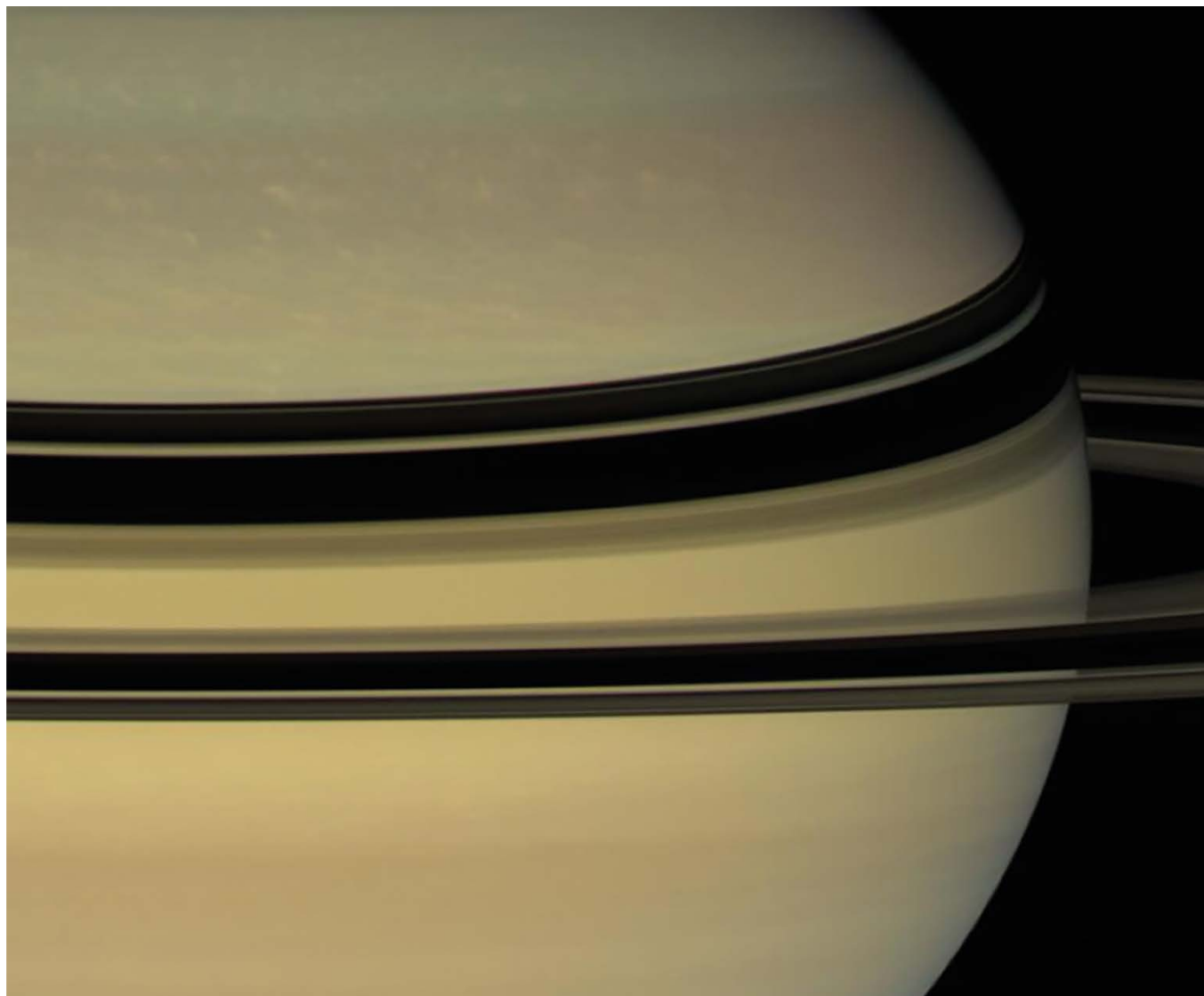
A New Perspective on the Age of Saturn's Rings

Une étude récente, publiée dans Nature Geoscience le 16 décembre 2024, révèle que les anneaux de Saturne pourraient être bien plus anciens qu'on ne le pensait.

Le Dr Ryuki HYODO, Chief Scientific Officer (CSO) chez SpaceData Inc. et affilié à l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) ainsi qu'à Science Tokyo (Université de Tokyo),

A recent study, published in Nature Geoscience on December 16, 2024, reveals that Saturn's rings may be much older than previously thought.

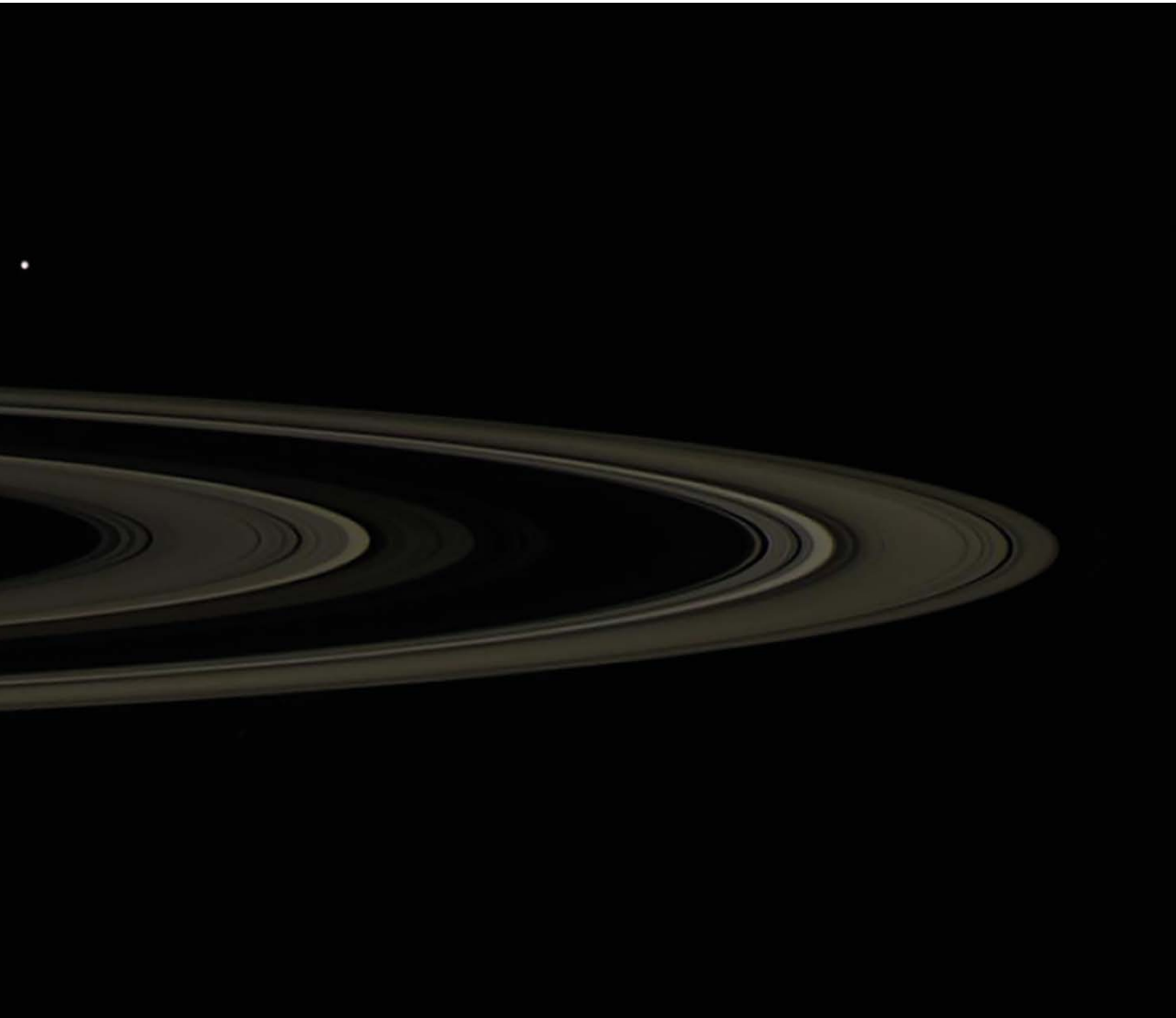
Dr. Ryuki HYODO, Chief Scientific Officer (CSO) at SpaceData Inc. and affiliated with the IPGP and Science Tokyo (University of Tokyo), in collaboration with Dr. Gustavo MADEIRA





en collaboration avec le Dr Gustavo MADEIRA de l'IPGP et de l'Université Paris Cité, ainsi que le Dr Hidenori GENDA de Science Tokyo, a démontré que la formation des anneaux de Saturne pourrait être bien antérieure à ce que l'on pensait. Leur apparence jeune, brillante et riche en glace d'eau, ne serait qu'une illusion. Cette étude, publiée dans la revue *Nature Geoscience*, remet en question les hypothèses traditionnelles grâce à des modèles théoriques et des simulations numériques.

from IPGP and Université Paris Cité, as well as Dr. Hidenori GENDA from Science Tokyo, demonstrated that the formation of Saturn's rings could date back much earlier than previously believed. Their water-ice-rich composition, almost devoid of dusty material is traditionally interpreted to be an argument proving they are much younger than the solar system and formed recently. This new study shows that it may actually be an illusion. This study, published in the journal *Nature Geoscience*, challenges traditional hypotheses through theoretical models and numerical simulations.



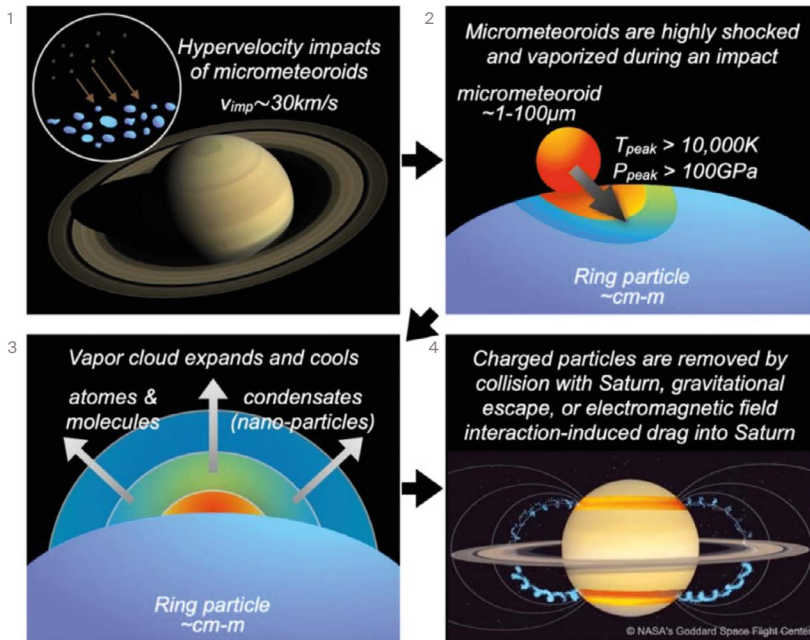
©NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute.

Pour la première fois, l'équipe a prouvé que les anneaux de Saturne sont hautement résistants à la contamination par des micrométéorites exogènes. Ce mécanisme de « nettoyage » thermodynamique expliquerait leur apparence « jeune », tout en indiquant qu'ils pourraient en réalité dater de la formation du Système solaire, il y a environ 4,5 milliards d'années. Ces découvertes bouleversent l'idée dominante selon laquelle les anneaux de Saturne seraient relativement récents, âgés de seulement 400 millions d'années.

Ce mécanisme, illustré dans la figure 1, décrit comment les micrométéorites interagissent avec les anneaux de Saturne. Lorsqu'une micrométéorite percute les particules des anneaux à une vitesse de 20 km/s, l'impact extrêmement violent entraîne la vaporisation complète de la micrométéorite, formant un plasma chaud atteignant une température d'environ 10 000 degrés Celsius. Ce matériau ionisé est ensuite rapidement évacué sous l'effet du champ magnétique de Saturne, soit en étant attiré vers la planète elle-même, soit en étant expulsé à l'extérieur des anneaux. Ce processus contribue à maintenir la pureté et la brillance des anneaux en empêchant l'accumulation de matières étrangères.

For the first time, the team has proven that Saturn's rings are highly resistant to contamination by exogenous micrometeoroids. This thermodynamic "cleaning" mechanism explains their "young" appearance while suggesting they may in fact date back to the formation of the Solar System, around 4.5 billion years ago. These findings upend the prevailing idea that Saturn's rings are relatively recent, with an estimated age of only 400 million years.

This mechanism, illustrated in Figure 1, describes how micrometeoroids interact with Saturn's rings. When a micrometeoroid collides with ring particles at a velocity of 20 km/s, the extreme impact causes the micrometeoroid to completely vaporize, forming a hot plasma at a temperature of around 10,000 degrees Celsius. This ionized material is then rapidly ejected due to Saturn's magnetic field, either being pulled toward the planet itself or expelled outward beyond the rings. This process helps maintain the purity and brilliance of the rings by preventing the accumulation of foreign matter.



Représentation schématique du mécanisme de protection des anneaux de Saturne. (1) Des micrométéorites frappent régulièrement, et à la vitesse de 20 km/s les anneaux de Saturne et les noircissent. (2) pendant le choc, le matériau est transformé en plasma et est porté à des températures supérieures à 10000 degrés ! (3) un nuage de plasma ionisé se forme et s'étend rapidement (4) les atomes ionisés sont couplés au champ magnétique de saturne et sont soit éjectés, soit transportés dans la planète.

Schematic representation of the protection mechanism for Saturn's rings (1) Micrometeoroids regularly strike Saturn's rings at a velocity of 20 km/s, causing darkening. (2) During the impact, the material is transformed into plasma and heated to temperatures exceeding 10,000 degrees. (3) A cloud of ionized plasma forms and rapidly expands. (4) The ionized atoms are coupled to Saturn's magnetic field and are either ejected or transported into the planet. Credit : NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute



Le bombardement par des micrométéorites est constitué de minuscules particules de poussière, principalement composées de carbone et de silicates, qui proviennent de l'extérieur du système saturnien, notamment de la ceinture de Kuiper. On pensait autrefois que ces particules s'accumulaient progressivement sur des objets célestes, y compris les anneaux de Saturne, entraînant leur assombrissement et une augmentation des composants non glacés. Cependant, les observations de la sonde Cassini (NASA-ESA) ont révélé que les anneaux de Saturne sont composés à plus de 99 % de glace d'eau. Cette composition a conduit à des études dans les années 2010-2020, estimant leur âge à un maximum de 400 millions d'années en mesurant simplement le temps nécessaire pour que cette « poussière » s'accumule. Les travaux récents remettent en cause cette méthode.

L'étude révèle des mécanismes empêchant l'accumulation des micrométéorites sur les anneaux de Saturne. Ces mécanismes impliquent que les anneaux pourraient être aussi anciens que le Système solaire lui-même. Ces résultats soulignent que juger l'âge des anneaux d'après leur apparence peut être trompeur, modifiant ainsi considérablement notre compréhension de leur origine et de leur évolution.

Cette étude établit une nouvelle base pour repenser l'évolution des anneaux de Saturne et les processus de formation des systèmes d'anneaux autour d'autres planètes. Comprendre quand et comment ces structures gigantesques se sont formées pourrait enrichir notre compréhension de l'histoire du Système solaire, tout en fournissant des indices sur l'évolution de la Terre en une planète habitable.

Micrometeoroid bombardment consists of tiny dust particles, primarily composed of carbon and silicates, originating from outside Saturn's system, such as the Kuiper Belt. These particles were once thought to accumulate progressively on celestial objects, including Saturn's rings, leading to their darkening and an increase in non-icy components.

However, observations from the Cassini spacecraft (NASA-ESA) revealed that Saturn's rings are composed of more than 99% water ice. This composition led to studies in the 2010s–2020s that estimated their age to be no more than 400 million years, based on the time required for such “dust” to accumulate. Recent findings challenge this method.

The study identifies mechanisms that prevent micrometeoroids from accumulating on Saturn's rings. These mechanisms suggest the rings could be as old as the Solar System itself. These results emphasize that evaluating the rings' age based only their appearance, that is the abundance of dusty material in the ring only, can be misleading, significantly altering our understanding of their origin and evolution.

This study establishes a new framework for rethinking the evolution of Saturn's rings and the formation processes of ring systems around other planets. Understanding when and how these massive structures formed could enrich our knowledge of the Solar System's history while providing insights into Earth's evolution as a habitable planet.

#3

Mission JUICE : L'IPGP contribue à affiner le regard de MAJIS sur les lunes de Jupiter

JUICE Mission : IPGP helps refine MAJIS's view of Jupiter's moons

L'équipe Planétologie et sciences spatiales de l'IPGP a participé à la campagne d'étalonnage au sol de l'instrument MAJIS (Moons and Jupiter Imaging Spectrometer), embarqué sur la sonde JUICE (JUperiter ICy moons Explorer) de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) lancée en avril 2023 et qui devrait arriver autour de Jupiter en 2031. La mission JUICE a pour objectif principal d'explorer le système de Jupiter, en particulier ses quatre plus grandes lunes glacées (Ganymède, Callisto, Io et Europe) qui ont un fort potentiel pour abriter ou avoir abrité de la vie en raison de leurs océans souterrains. Parmi les instruments embarqués qui permettront de déterminer si les conditions environnementales de ces lunes rendent ces mondes habitables, MAJIS, un spectromètre imageur dans le domaine visible et proche infrarouge, est l'un des principaux instruments de télédétection qui permettront de répondre à ces objectifs, à travers l'analyse de la minéralogie et la géologie de la surface de ces lunes glacées et de la caractérisation de leur exosphère, en lien avec leur activité interne.

IPGP's Planetology and Space Sciences research team took part in the ground calibration campaign for the MAJIS instrument (Moons and Jupiter Imaging Spectrometer), on board the JUICE (JUperiter ICy moons Explorer) mission of the European Space Agency (ESA), launched in April 2023 and scheduled to arrive around Jupiter in 2031. The main objective of the JUICE mission is to explore the Jupiter system, in particular its four largest icy moons (Ganymede, Callisto, Io and Europa), which have a strong potential to harbor or have harbored life due to their underground oceans. MAJIS, an imaging spectrometer in the visible and near-infrared range, is one of the main remote sensing instruments used to determine whether the environmental conditions of these icy moons make them habitable, by analyzing the mineralogy and geology of their surface and characterizing their exosphere in relation to their internal activity.



L'équipe impliquée dans la campagne d'étalonnage au sol de l'instrument MAJIS.

The team involved in the MAJIS ground calibration campaign



L'équipe Planétologie et sciences spatiales a ainsi contribué à l'analyse des données d'étalonnage obtenues sur des échantillons terrestres, pour une évaluation précise des performances de MAJIS dans des conditions proches de celles qu'il rencontrera dans le système jovien. Les résultats de ces analyses, détaillés sous la forme de publications, fournissent des informations essentielles pour la préparation des futures observations et donnent un aperçu des capacités de l'instrument. La comparaison des données d'étalonnage au sol avec les premières données en vol a permis d'identifier et de réaliser des ajustements mineurs dans la réponse de l'instrument et l'alignement des canaux spectraux.

The Planetology and Space Science team has thus contributed to the analysis of calibration data obtained on terrestrial samples, for a precise assessment of MAJIS performance in conditions close to those it will encounter in the Jovian system. The results of these analyses, detailed in the form of publications, provide essential information for the preparation of future observations and give an insight into the instrument's capabilities. Comparison of the ground calibration data with the first in-flight data has enabled to identify and make minor adjustments to the instrument's response and spectral channel alignment.

Ref : Rodriguez S, Vincendon M, Haffoud P, Langevin Y, Poulet F, Quirico E, Pilorget C, Filacchione G, Carter J, Brunetto R, Lecomte B, Guiot P, Dumesnil C, Piccioni G. Calibration of MAJIS (Moons and Jupiter Imaging Spectrometer): V. **Validation with mineral samples and reference materials.** Rev Sci Instrum. 2024 Oct 1 ;95(10):101301. doi : 10.1063/5.0215249. PMID : 39382390.

Contact : Sebastien Rodriguez | rodriguez@ipgp.fr



Comprendre l'origine de la Lune à partir des échantillons ramenés par les missions d'Apollo à Chang'e

Understanding the Origin of the Moon from Samples Returned by Apollo to Chang'e Missions

Depuis plus de cinquante ans, le retour d'échantillons lunaires a profondément transformé notre compréhension de la Lune et, par extension, de l'histoire du Système Solaire. Des missions Apollo (USA) et Luna (URSS) entre 1969 et 1976 aux récentes missions Chang'e (Chine), ces précieuses roches lunaires nous permettent d'explorer les processus ayant conduit à la formation et à l'évolution chimique de notre satellite naturel. Grâce aux avancées en cosmochimie et en spectrométrie de masse, nous avons aujourd'hui la capacité d'analyser avec une précision inégalée les signatures isotopiques des métaux et des éléments volatils, afin de mieux comprendre les événements ayant façonné la Lune.

L'apport des retours d'échantillons lunaires : des missions Apollo à Chang'e 6

Les missions Apollo ont marqué une avancée majeure en cosmochimie en rapportant près de 380 kg de roches lunaires. Ces échantillons ont non seulement permis le développement de techniques analytiques de haute précision, mais aussi révolutionné notre compréhension de la formation de la Lune. Parmi les découvertes clés, la datation des roches lunaires a révélé que la croûte primitive de la Lune s'est formée plusieurs centaines de millions d'années avant les plus anciennes roches terrestres connues¹. De plus, la similitude isotopique entre la Terre et la Lune pour des éléments non volatils comme l'oxygène², le titane³ et le chrome⁴ suggère une origine commune du matériau ayant formé ces deux corps.

En parallèle, la très faible teneur en éléments volatils des échantillons lunaires a conforté l'hypothèse de la formation de la Lune suite à un impact géant entre la proto-Terre et un corps de la taille de Mars, nommé Theia. Cependant, ces échantillons provenaient

For over fifty years, the return of lunar samples has profoundly transformed our understanding of the Moon and, by extension, the history of the Solar System. From the Apollo (USA) and Luna (USSR) missions between 1969 and 1976 to the recent Chang'e missions (China), these precious lunar rocks have enabled us to explore the processes that led to the formation and chemical evolution of our natural satellite. Thanks to advances in cosmochemistry and mass spectrometry, we now have the ability to analyze with unprecedented precision the isotopic signatures of metals and volatile elements, in order to better understand the events that shaped the Moon.

The Contribution of Lunar Sample Returns : From Apollo to Chang'e 6

The Apollo missions marked a major breakthrough in cosmochemistry by bringing back nearly 380 kg of lunar rocks. These samples not only led to the development of high-precision analytical techniques, but also revolutionized our understanding of the Moon's formation. Among the key discoveries, the dating of lunar rocks revealed that the Moon's primordial crust formed several hundred million years before the oldest known terrestrial rocks¹. Furthermore, the isotopic similarity between Earth and the Moon for non-volatile elements such as oxygen², titanium³, and chromium⁴ suggests a common origin for the material that formed both bodies.

At the same time, the very low content of volatile elements in the lunar samples supported the hypothesis that the Moon formed as a result of a giant impact between the proto-Earth and a Mars-sized body named Theia. However, these samples came

1. Albee *et al.* Ages irradiation history, and chemical composition of lunar rocks from the Sea of Tranquility, 1970, Science, 167, 463-466

2. Wiechert *et al.*, Oxygen isotopes and the Moon-forming giant impact, 2001, Science 294, 345-348

3. Zhang *et al.* The proto-Earth as a significant source of lunar material, 2012, Nature Geosciences, 5, 251-255 4.

4. Mougél *et al.* Chromium isotopic homogeneity between the Moon, the Earth, and enstatite chondrites, Earth and Planetary Science Letters, 481, 1-8



exclusivement de la face visible de la Lune, limitant notre compréhension globale de sa composition. C'est dans cette perspective que les missions Chang'e 5 et Chang'e 6 ont été conçues afin d'explorer de nouvelles régions lunaires et d'apporter des échantillons offrant un aperçu plus représentatif de la diversité géologique de la Lune.

L'implication de l'IPGP dans l'étude des échantillons lunaires

L'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) est l'un des rares instituts à avoir étudié l'ensemble des échantillons extra-terrestres ramenés par des missions spatiales, incluant des échantillons des différentes missions Apollo et Luna^{5, 6, 7}. Nos recherches actuelles soutenue par l'European Research Council via le projet METAL, portent notamment sur l'analyse des isotopes des métaux volatils (Cu, Zn, Rb, Ga) afin d'explorer les causes

exclusively from the near side of the Moon, limiting our overall understanding of its composition. It is with this in mind that the Chang'e 5 and Chang'e 6 missions were designed to explore new lunar regions and provide samples offering a more representative glimpse of the Moon's geological diversity.

IPGP's Involvement in the Study of Lunar Samples

The Institut de physique du globe de Paris (IPGP) is one of the few institutes to have studied the full range of extraterrestrial samples returned by space missions, including those from the various Apollo and Luna missions^{5, 6, 7}. Our current research, supported by the European Research Council through the METAL project, focuses on the analysis of volatile metal

5. Birck and Allegre, 87Rb-87Sr age of soils and rock from Mare Crisium Luna 24, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 16, 10-14

6. Hashizume and Chaussidon, A non-terrestrial 16O-rich isotopic composition for the protosolar nebula, 2005, *Nature*, 434, 619-622

7. Paniello *et al.* Zinc isotopic evidence for the origin of the Moon, 2012, *Nature*, 490. 376-379



© Frédéric Moynier.



de l'appauvrissement en volatils de la Lune révélé par les missions Apollo, et d'en déduire les conditions régnant lors de sa formation^{8, 9, 10, 11}. Nos travaux ont démontré, pour la première fois, que cette perte de volatils s'est produite par évaporation à la suite de l'impact géant.

L'analyse isotopique de certains éléments a permis d'estimer les températures d'évaporation entre 1600 et 1800 K, correspondant aux températures de dégazage à la surface d'un océan de magma lunaire¹². Ce résultat contredit les hypothèses précédentes postulant des températures supérieures à 5000 K, caractéristiques de l'impact lui-même. Des simulations numériques ont ensuite démontré que cette perte de volatils a dû se produire peu après la formation de la Lune, alors qu'elle était encore 60 fois plus proche de la Terre qu'aujourd'hui. Il est même possible que ces éléments volatils aient été ensuite capturés par la Terre¹³.

Jusqu'à présent, nos connaissances sur la Lune reposaient uniquement sur l'étude des échantillons de la face visible, en supposant qu'ils étaient représentatifs de l'ensemble du satellite. Toutefois, avec le retour d'échantillons issus de nouvelles régions, cette hypothèse est aujourd'hui remise en question¹⁴.

Une nouvelle ère de missions de retour d'échantillons : Chang'e et Artemis

Depuis quelques années, nous sommes entrés dans une nouvelle ère d'exploration spatiale, marquée par les missions Chang'e de l'agence spatiale chinoise et le programme Artemis de la NASA. La mission Chang'e 5, revenue sur Terre en 2020 avec 1,7 kg de roches lunaires, a collecté des échantillons provenant d'une région peu cratérisée de la face visible de la Lune, suggérant une surface relativement jeune. Cette hypothèse a été confirmée par la datation de ces roches à environ 2 milliards d'années, soit un milliard d'années plus jeunes que les plus jeunes basaltes des missions Apollo¹⁵.

isotopes (Cu, Zn, Rb, Ga) to investigate the causes of the Moon's volatile depletion revealed by the Apollo missions, and to deduce the conditions present at the time of its formation^{8, 9, 10, 11}. Our work has demonstrated, for the first time, that this loss of volatiles occurred through evaporation following the giant impact.

The isotopic analysis of certain elements has allowed us to estimate evaporation temperatures between 1600 and 1800 K, corresponding to the degassing temperatures at the surface of a lunar magma ocean¹². This result contradicts previous hypotheses that proposed temperatures above 5000 K, characteristic of the impact event itself. Numerical simulations have since shown that this volatile loss must have occurred shortly after the Moon's formation, when it was still 60 times closer to Earth than it is today. It is even possible that these volatiles were subsequently captured by Earth¹³.

Until now, our knowledge of the Moon was based solely on samples from the near side, assuming they were representative of the entire satellite. However, with the return of samples from new regions, this assumption is now being challenged¹⁴.

A New Era of Sample Return Missions : Chang'e and Artemis

In recent years, we have entered a new era of space exploration, marked by China's Chang'e missions and NASA's Artemis program. The Chang'e 5 mission, which returned to Earth in 2020 with 1.7 kg of lunar rocks, collected samples from a sparsely cratered region of the Moon's near side, suggesting a relatively young surface. This hypothesis was confirmed by dating the rocks to about 2 billion years, making them a billion years younger than the youngest basalts from the Apollo missions¹⁵.

8. Kato *et al.* Extensive volatile loss during formation and differentiation of the Moon, 2015, Nature Communications, 6, 7617.

9. Kato and Moynier, Gallium isotopic evidence for extensive volatile loss from the Moon during its formation, 2017, Science Advances, 3, e1700571.

10. Pringle and Moynier, Rubidium isotopic composition of the Earth, meteorites, and the Moon : Evidence for the origin and volatile loss during planetary accretion, 2017, Earth and Planetary Science Letters, 473, 62-70.

11. Paquet *et al.*, Volatile loss history of the Moon from the copper isotopic compositions of mare basalts, 2025, Earth and Planetary Science Letters, 656, 119250.

12. Sossi *et al.* Volatile loss following cooling and accretion of the Moon revealed by chromium isotopes, 2018, Proceedings of the National Academy of Sciences, 115, 10920-10925.

13. Madeira *et al.* Hydrodynamical simulations of proto-Moon degassing, 2025, Earth and Planetary Science Letters, 651, 119163.

14. Tartese *et al.* Conditions and extent of volatile loss from the Moon during formation of the Procellarum basin, 2021, Proceedings of the National Academy of Sciences, 118, e2023023118.

15. Che *et al.* Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'e 5, 2021, Science, 374, 887-890.

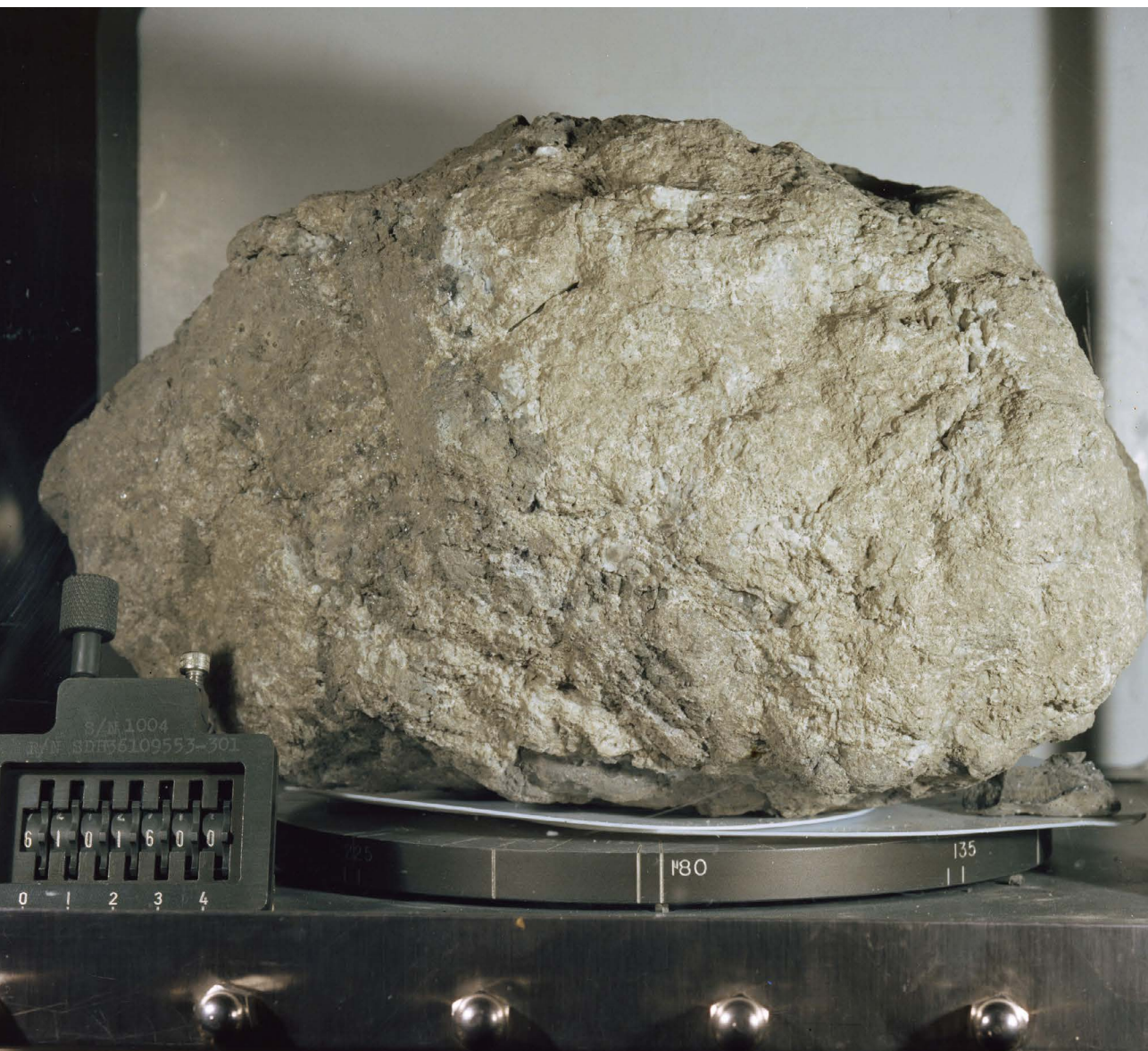


Photo de la NASA montrant l'échantillon lunaire 61016, plus connu sous le nom de Big Muley, la plus grosse roche rapportée de la Lune lors du programme Apollo. Cette roche, une brèche, a été découverte et collectée lors de la mission Apollo 16. ©Nasa.

NASA lab photo of Lunar Sample 61016, better known as Big Muley, the largest rock returned from the Moon during the Apollo program. This rock, a breccia, was discovered and collected on Apollo 16. ©Nasa.



Ces nouvelles analyses remettent en cause certaines des généralisations sur le magmatisme lunaire faites à partir des échantillons Apollo sur la composition globale de la Lune. C'est dans ce cadre que j'ai eu l'honneur d'être le seul chercheur français sélectionné pour récupérer ces échantillons en Chine et mener des analyses isotopiques de métaux afin de mieux comprendre l'origine de l'appauvrissement en volatils de la Lune. Ce projet bénéficie du soutien du CNES et les échantillons seront récupérés en main propre à Pékin en avril 2025.

Vers l'exploration de la face cachée de la Lune

La mission Chang'e 6 a rapporté en 2024 les premiers échantillons provenant du pôle sud de la face cachée de la Lune, une avancée majeure pour l'étude de notre satellite. Ces échantillons, collectés dans le bassin d'impact du Pôle Sud-Aitken, fournissent des données inédites sur la composition lunaire. Cette région, l'une des plus anciennes de la Lune, est caractérisée par une densité élevée de cratères et pourrait contenir des fragments du manteau lunaire, jamais échantillonnés jusqu'à présent.

Le bassin du Pôle Sud-Aitken, le plus grand de la Lune, a été formé par un impact gigantesque qui a « creusé » la surface, créant une croûte particulièrement fine. Certaines études suggèrent même que l'impact aurait atteint le manteau lunaire, rendant cette zone propice à l'exploration scientifique. Les premières datations des échantillons montrent deux épisodes volcaniques distincts : un volcanisme datant de 4,2 milliards d'années, avec un basalte riche en éléments radioactifs (KREEP), et un volcanisme plus récent, il y a environ 2,8 milliards d'années.

L'impact à l'origine du bassin a probablement influencé la composition du manteau sous-jacent, appauvri en éléments radioactifs. Cette particularité limite la fusion partielle des roches et explique l'absence de vastes plaines volcaniques, contrairement à ce que l'on attendait de la fine croûte. Cette découverte renforce l'idée que la face cachée de la Lune possède moins de « mers » que la face visible, une dichotomie qui pourrait être liée à l'impact qui a perturbé la distribution des matériaux sous la surface.

These new analyses challenge some generalizations about lunar magmatism made from Apollo samples regarding the Moon's overall composition. In this context, I had the honor of being the only French researcher selected to retrieve these samples in China and conduct isotopic analyses of metals to better understand the origin of the Moon's volatile depletion. This project is supported by CNES, and the samples will be collected in person in Beijing in April 2025.

Towards the Exploration of the Far Side of the Moon

The Chang'e 6 mission returned in 2024 with the first samples from the south pole of the Moon's far side—a major milestone in the study of our satellite. These samples, collected in the South Pole–Aitken impact basin, provide unprecedented data on lunar composition. This region, one of the oldest on the Moon, is characterized by a high density of craters and may contain fragments of the lunar mantle, never before sampled.

The South Pole–Aitken basin, the Moon's largest, was formed by a gigantic impact that “dug” into the surface, creating an exceptionally thin crust. Some studies even suggest the impact may have reached the lunar mantle, making this area particularly favorable for scientific exploration. Preliminary dating of the samples reveals two distinct volcanic episodes : one around 4.2 billion years ago, with basalt rich in radioactive elements (KREEP), and a more recent one about 2.8 billion years ago.

The impact that created the basin likely influenced the composition of the underlying mantle, which appears to be depleted in radioactive elements. This peculiarity limits partial rock melting and explains the absence of vast volcanic plains, contrary to what might be expected from a thin crust. This discovery reinforces the idea that the far side of the Moon has fewer “seas” than the near side—a dichotomy that could be linked to the impact that disturbed the distribution of materials beneath the surface.



Nous ne sommes qu'au tout début de l'analyse de ces échantillons, et de nombreuses découvertes restent à faire. Les données collectées ouvrent de nouvelles perspectives, mais il faudra encore beaucoup de recherches pour pleinement comprendre leur portée scientifique.

L'avenir de l'exploration lunaire s'écrit avec les prochaines missions Chang'e 7 et Chang'e 8 au pôle sud lunaire, équipé d'analyseurs in-situ de volatils et qui prépareront l'installation d'une base habitée sur la Lune. En parallèle, le programme Artemis prévoit également le retour d'astronautes sur la surface lunaire, avec des collectes importantes d'échantillons dès 2027.

L'IPGP demeure ainsi au cœur de ces découvertes, poursuivant son engagement dans l'analyse des échantillons extraterrestres afin de mieux comprendre l'histoire de la Terre et de son satellite naturel.

We are only at the very beginning of analyzing these samples, and many discoveries are yet to come. The collected data opens up new perspectives, but much research remains to fully grasp their scientific significance.

The future of lunar exploration will be shaped by upcoming missions such as Chang'e 7 and Chang'e 8 to the lunar south pole, equipped with in-situ volatile analyzers and paving the way for a manned lunar base. In parallel, the Artemis program also plans the return of astronauts to the Moon's surface, with significant sample collections starting in 2027.

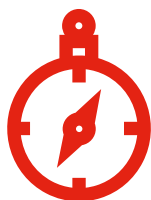
The IPGP thus remains at the heart of these discoveries, continuing its commitment to analyzing extraterrestrial samples to better understand the history of Earth and its natural satellite.





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 Dalat (Vietnam), Île de Paques (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 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 IPGP's Magnetic Observatories service provides ground-based observations of the Earth's magnetic field as well as derived products. It is a component of the Bureau Central de Magnétisme Terrestre (BCMT), managed by the IPGP, which is a "Service National d'Observation" (SNO) of the CNRS-INSU. The magnetic observation service of the EOST in Strasbourg also participates to the BCMT. The IPGP maintains the networks of French variation and repetition stations, as well as ten observatories in collaboration with French and international institutions : the national magnetic observatory at Chambon-la-Forêt (Loiret) and those at Dalat (Vietnam), Easter Island (Chile), Edéa (Cameroon), Kourou (French Guiana), Réunion, Sop/Niakhar (Senegal), Phu Thuy (Vietnam), Pamatai (French Polynesia) and Tamanrasset (Algeria). Most of them are part of the international INTERMAGNET network. The observatories are operated by observers specifically trained to carry out weekly calibration measurements. The observations made are both highly accurate and highly stable over the long term. The observatories provide real-time, quasi-definitive and definitive data, which are distributed in the form of seconds, one-minute averages or longer periods (hour, day, month, year). These data are distributed via the BCMT and INTERMAGNET web portals, as well as via the World Data Centres (WDC) in the UK, USA and Japan. These data are used primarily for research activities (dynamics of the Earth's liquid core, conductivity of the mantle, structure of the crust, dynamics of the ionosphere and magnetosphere, etc.), but also as orientation references for industry and as tools for monitoring space weather. In addition to its observation activities, the department manages a magnetic calibration platform for checking the response of an observation system to variations in the magnetic field or ambient temperature.



Activités en 2024

Activities in 2024

Les activités de routine de l'équipe couvrent 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 de l'observatoire de l'île de Pâques, l'ouverture de la station de variation à Helfaut (Nord, 59) et l'intégration au réseau INTERMAGNET de l'observatoire de la Réunion. Ces trois points sont détaillés ci-dessous.

The day to day activities of the IPGP magnetic observatory service cover, as each year, processing and distributing the collected magnetic data as well as maintaining the networks of magnetic observatories and variation stations. In particular, in 2024, the observatory from Easter Island has been fully refurbished, a new variometer station has been opened in Helfaut (France, Nord, 59) and the observatory from La Réunion Island has been integrated in the INTERMAGNET network. These three points are presented with more details in the following.

■ Rénovation de l'observatoire de l'île de Pâques

Refurbishing the Easter Island observatory

L'observatoire de l'île de Pâques (IPM) a été ouvert en 2004. Ce site d'observation est naturellement très isolé puisque l'observatoire magnétique le plus proche est celui de Pamataï à Tahiti à plus de 4000km à l'Ouest. Le système d'observation sur place a commencé à montrer des signes de dysfonctionnement dès 2019, mais la pandémie de Covid-19 nous a imposé de reporter les missions de maintenances nécessaires de plusieurs années. Les coûts, les distances et les autres urgences de maintenance ont retardé la rénovation d'IPM qui n'a pu être menée à bien qu'en 2024. Le système d'observation a été entièrement remis en état. Les bâtiments d'observation ont été nettoyés et les systèmes de transmission des données mis à jour pour que les données collectées soient disponibles sur le site internet du BCMT (www.bcmt.fr) sous cinq minutes. L'observatoire d'IPM, maintenant opérationnel, reste un des observatoires les plus isolés au monde.

The Easter Island observatory (IPM) has been opened in 2004. This observation site is very isolated as the next closest magnetic observatory is situated on Pamataï Island in Tahiti more than 4000 km away to the West. The local observation system started to show signs of weakness already in 2019, but the COVID pandemic obliged us to postpone by several years the required maintenance work on site. The distances, costs and other urgently needed maintenance missions have delayed up to 2024 the required work at IPM. This year, the observational infrastructure on site has been fully refurbished. The observation shelters have been cleaned and the data acquisition and transmission systems updated such that the collected data are made available to the scientific community on the BCMT web portal (www.bcmt.fr) under five minutes after observation. The IPM magnetic observatory, one of the most isolated in the world is now again in working order.



À gauche, modernisation du coffre de gestion de l'énergie de l'observatoire d'IPM, à droite, pause et récupération après plusieurs jour de travail intensif pour la mise à jour de l'observatoire.

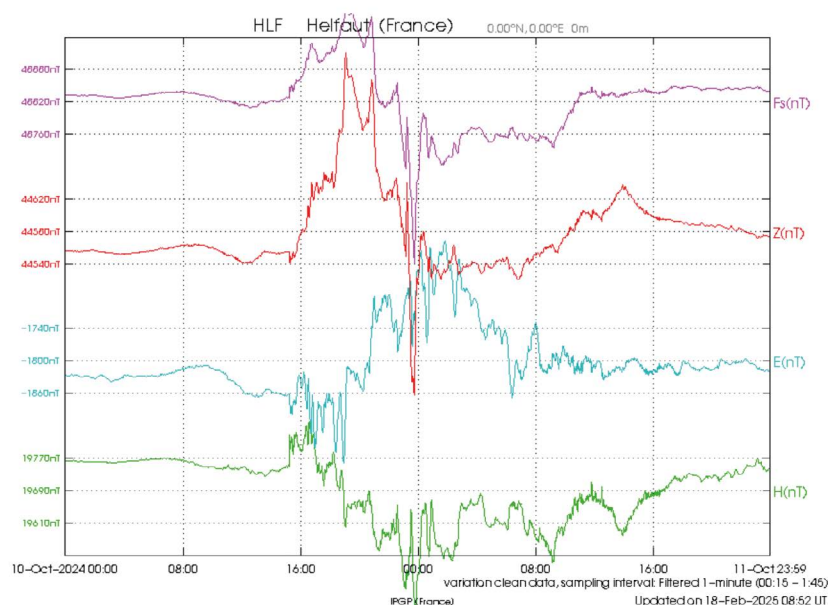
Left, upgrade of the energy distribution system of the IPM observatory. Right : few minutes of rest after an intensive week long maintenance work on the observatory site.



■ Ouverture de la station de variation à Helfaut Opening of a variometer station at Helfaut

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 magnétique pour des applications scientifiques aussi bien que techniques et industrielles. Après l'ouverture en 2022 d'une station à proximité de Clermont-Ferrand, puis de la station de Menez-Meur (Finistère) en 2023, un système d'observation a été installé sur le site de Helfaut dans le Nord. Ce site était déjà utilisé pour une station sismique du réseau large bande Français. 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 premier 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. 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.

The strategic development plan of the French national magnetic observation infrastructure includes setting five new magnetic variometer stations on the territory, in addition to the existing national magnetic observatory. The goal is on one side to maintain an observation system for the long-term evolution of the Earth's natural magnetic field over France and on the other side, develop the observational mean to have a better description of the fast magnetic field variations for scientific, technic and industrial applications. After opening a variometer station next to Clermont-Ferrand in 2022, and another one in Menez-Meur (France, Finistère) in 2023, a magnetic observation system has been set at the Helfaut site in the Northern France. This latter site has been already used for several years for a seismic station of the French seismic monitoring network. Adding a magnetic station on the pre-existing infrastructure reduces significantly the installation costs and is a first step towards setting multi-parameter observation stations, as planned in the framework of the French research infrastructure "EPOS-France". A series of tests have shown that the site is suitable for magnetic observations, and hardly affected by anthropological and industrial noise. As all other continuous observation sites managed by IPGP observatory service, the acquired data are distributed under 5 minutes through the web portal www.bcmt.fr.



Orage magnétique du 10 Octobre 2024, tel qu'il a été enregistré par la station de variation sur le site d'Helfaut (Nord, 59)

Geomagnetic storm of October 2024, the tenth, as recorded by the magnetic variation station of Helfaut (France, Nord).

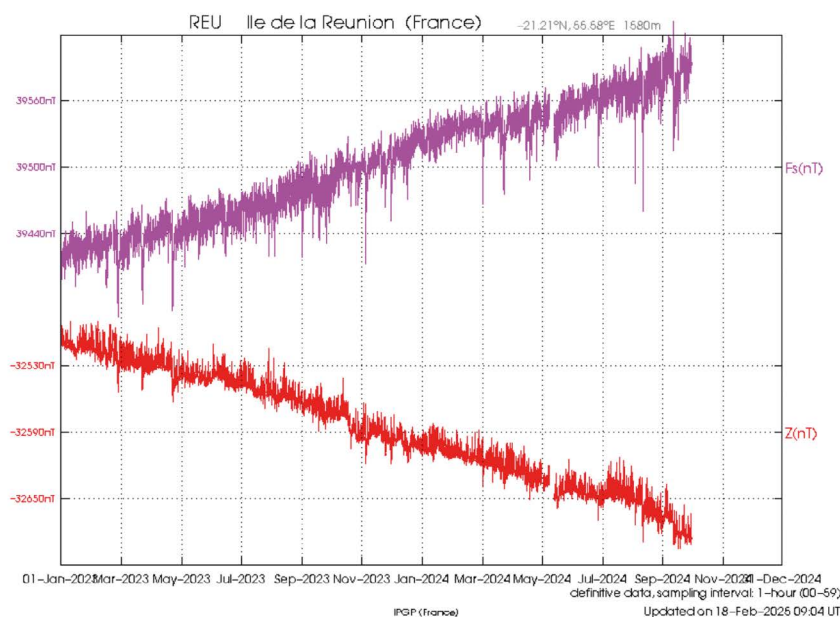


■ Candidature à INTERMAGNET de l'observatoire de La Réunion

Application to INTERMAGNET for the La Réunion observatory

L'observatoire de la Réunion (REU) a été installé en fin 2022, sur la plaine des Cafres, dans une zone relativement plate de l'île, à proximité de l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF). L'observatoire a permis la collection continue de données magnétiques de variation ces deux dernières années. Celles-ci sont complétées par des données manuelles de calibration effectuées par des membres de l'OVPF. La combinaison de ces deux types de données nous a permis de générer un jeu de données définitives qui respecte les critères de qualité imposés par INTERMAGNET, une organisation internationale, dont l'IPGP est membre fondateur, cherchant à promouvoir des techniques et méthodes d'observations magnétiques fiables. La construction d'un observatoire sur une île volcanique vient avec des difficultés particulières dues à la forte aimantation des roches et les gradients du champ magnétique qui en découlent. L'observatoire de La Réunion n'échappe pas à cette règle et des techniques de calibration innovantes ont été développées pour gérer ces gradients (Heumez *et al.* 2025). Deux années d'observations continues à La Réunion confirment la variation très rapide du champ magnétique principal dans cette région du globe. Du fait de son isolement, l'observatoire joue un rôle primordial aussi bien pour le suivi des variations du champ généré dans le noyau de la terre, que celles dues aux champs générés dans la magnétosphère et ionosphère terrestre.

The La Réunion observatory (REU) was set up at the end of 2022, on the Plaine des Cafres, in a relatively flat area of the island, close to the Piton de la Fournaise Volcanological Observatory (OVPF). Two years of vector variometer data have been continuously collected in the observatory. These are complemented by manual calibration data collected by OVPF members. The combination of these two types of data has enabled us to generate a definitive data set that meets the quality criteria imposed by INTERMAGNET, an international organization, of which IPGP is a founding member, seeking to promote reliable magnetic observation techniques and methods. Building an observatory on a volcanic island comes with difficulties due to the strong magnetization of the rocks and associated magnetic field gradients. The La Réunion observatory is no exception to this rule, and innovative calibration techniques have been developed to manage these gradients (Heumez *et al.* 2025 -- <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-46>). These two years of continuous observations at La Réunion have confirmed the very rapid variation of the main magnetic field in this region of the globe. Because of its isolation, the observatory plays a vital role in monitoring variations in the field generated in the earth's core, as well as those due to fields generated in the earth's magnetosphere and ionosphere.



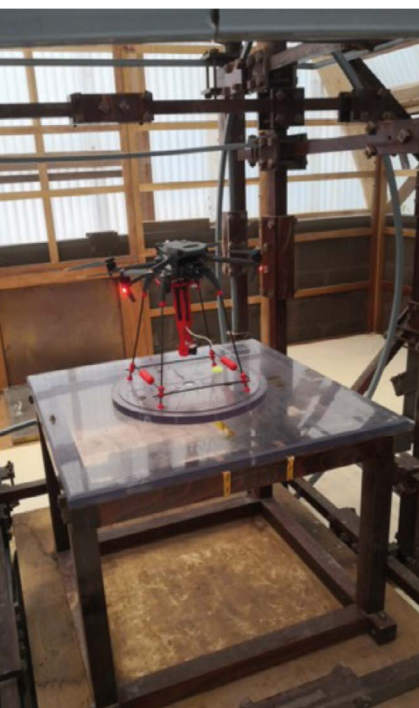


■ Calibration des drones de l'OPGC

Calibration of OPGC drones

Sur le site de l'observatoire magnétique national, une instrumentation pour la calibration des outils de mesures magnétiques a été développée il y a plusieurs dizaines d'années. Cette infrastructure a été mise en place pour les besoins propres de l'observatoire, mais aussi pour la calibration d'instruments construits pour des missions satellitaires. Ainsi, des instruments de la mission BepiColombo, vers Mercure et de la mission Juice, vers les lunes glacées de Jupiter, ont été partiellement calibrés à Chambon-la-forêt. Cette infrastructure est aussi utilisée pour la calibration de moyen de prospection magnétique terrestre. En particulier, en 2024, l'infrastructure a été utilisée pour estimer le signal généré par le drone, équipé d'un magnétomètre, de l'Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand. Ce drone utilisé pour des levés magnétiques sur des surfaces de tailles moyennes, ou lorsque l'accès à pied est difficile, était jusqu'à présent calibré en utilisant des techniques développées pour les levés aéroportés. L'utilisation d'un générateur de champ de grande dimension, du caisson à champ faible ou encore d'un site où le champ magnétique est connu très précisément, permet une calibration précise du drone et donc de la conduite de levés magnétiques de meilleure qualité.

On the site of the national magnetic observatory, equipment for the calibration of magnetic measurement tools was developed several decades ago. This infrastructure was set up for the observatory's own needs, but also for the calibration of instruments built for satellite missions. As examples, instruments for the BepiColombo mission to Mercury and the Juice mission to Jupiter's icy moons were partially calibrated at Chambon-la-forêt. The facility is also used to calibrate equipment for terrestrial magnetic survey. In particular, in 2024, the infrastructure was used to estimate the signal generated by the magnetometer-equipped drone of the Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand. This drone, used for magnetic surveys over medium-size areas or where pedestrian access is difficult, was previously calibrated using techniques developed for airborne surveys. The use of a large field generator, a low-field building or a site where the magnetic field is known very precisely, enables precise calibration of the drone and therefore the conduct of better quality magnetic surveys.



Calibration d'un drone utilisé lors de levés magnétiques à l'observatoire magnétique national.
Calibration of a drone used for magnetic surveys at the national magnetic observatory.



■ Collaborations, visites et accords

Collaborations, visits and agreements

Nous avons eu cette année le plaisir d'accueillir à l'observatoire magnétique national deux scientifiques :

- Otto Kärhä de l'université de Oulu, Finlande, est resté plusieurs semaines à l'observatoire en Mars 2024. Il a profité de son séjour pour apprendre à utiliser et contrôler un logiciel développé à l'IPGP dans le service des observatoires magnétiques. Ce logiciel permet d'extraire des valeurs numériques à partir d'images de magnétogrammes anciens, obtenus avec des instruments utilisant du papier photographique pour enregistrer les variations du champ magnétique.
- Tuo Zié, est venu travailler à l'observatoire national trois semaines à partir de fin avril 2024. Scientifique de la Côte d'Ivoire, il s'intéresse aux signaux magnétiques générés dans l'ionosphère. En effet, le nord de la Côte d'Ivoire se situe à proximité de cette zone très particulière du globe où le champ magnétique principal est pratiquement horizontal, ce qui a des effets importants sur les courants électriques s'écoulant dans l'ionosphère terrestre. Une collaboration débute pour installer un site d'observation magnétique dans cette région.

Cette année, un colloque sur l'observation du champ magnétique a été organisé au Brésil, à l'observatoire de Vassouras. Ce colloque a été mené en parallèle avec une école d'été pour former les nouveaux observateurs du champ magnétique terrestre. Deux membres de l'équipe des observatoires magnétiques de l'IPGP ont participé à ce colloque. Ils ont présenté les dernières évolutions de l'infrastructure d'observation magnétique français.

This year we had the pleasure of welcoming two scientists at the National Magnetic Observatory :

- Otto Kärhä, from Oulu University, Finland, stayed at the observatory for several weeks in March 2024. He took advantage of his stay to learn how to use and control a software developed at IPGP in the magnetic observatory department. This software extracts numerical values from images of old magnetograms, obtained with instruments that used photographic paper to record variations of the magnetic field.
- Tuo Zié, came to work at the national observatory for three weeks from the end of April 2024. Scientist from Côte d'Ivoire, he is interested in magnetic signals generated in the ionosphere. Northern Côte d'Ivoire lies close to this very special zone of the globe where the main magnetic field is practically horizontal. This has significant effects on the electric currents flowing in the Earth's ionosphere. Collecting magnetic data in this area is therefore particularly interesting. A collaboration is underway to set up a magnetic observation site in this region.

This year, a symposium on magnetic field observation has been held in Brazil, at the Vassouras observatory. The symposium was held in parallel with a summer school to train new observers of the Earth's magnetic field. Two members of IPGP's Magnetic Observatories team took part in the symposium. They presented the latest developments in the French magnetic observation infrastructure.

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 34 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 1750 publications mentionnant explicitement GEOSCOPE depuis 1982 (liste disponible sur le site web). 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). L'équipe est constituée de onze personnes, sept à l'IPGP et quatre à l'EOST (quatre enseignants-chercheurs, six ingénieurs et un administratif).

The mission of the GEOSCOPE observatory is to provide validated, high-quality broadband seismological data to the French and international seismological communities. With a network of 34 seismological stations around the world, all equipped to provide data in real time, GEOSCOPE is primarily dedicated to research activities. Its data are used for the study of the structure and dynamics of the Earth, the analysis of seismic sources, the temporal monitoring of deformation phenomena and environmental seismology. The observatory also provides real-time data to earthquake and tsunami warning agencies worldwide.

GEOSCOPE is jointly managed by the EOST in Strasbourg and the IPGP in Paris, which is responsible for the instrumentation and maintenance of 24 stations, as well as making all the data available through its data center. These data are also available via the Epos-France and Earthscope data centers and are widely used by the scientific community, with more than 1,750 publications explicitly mentioning GEOSCOPE since 1982 (list available on the website). These data are also used within the observatory to provide information such as the rapid estimation of earthquake source parameters (catalogue available on the website). The team is made up of eleven people, seven at the IPGP and four at the EOST (four researchers, six engineers and one administrative staff).



Activités en 2024

Activities in 2024

■ Travaux pour améliorer et entretenir le réseau

Work to improve and maintain the network

- Création de la nouvelle station **MATO** à l'Ouest du Brésil : durant les années 2022-2024, le site a été sélectionné et préparé en collaboration avec nos partenaires brésiliens de L'Université de Sao Paulo, et le forage du puits à 24mètres a été effectué par une entreprise locale. La nouvelle station a été installée en octobre 2024. Le puits a été instrumenté par un capteur T360 (Nanometrics) de nouvelle génération. Les données sont de très bonne qualité et sont reçues en temps réel à l'IPGP. Cette station rentre particulièrement bien dans les missions de l'Observatoire GEOSCOPE de part sa situation isolée, à distance des stations très large bande existantes.
- Terres Australes et Antarctique, hiver 2024 : Opérations de maintenance sur les sites des îles Kerguelen (**PAF**), Crozet (**CRZF**) et Amsterdam (**AIS**). Forage d'un nouveau puits à 30 mètres sur la base de Concordia (CCD) en Antarctique. La station AIS est cependant arrêtée pour un temps indéterminé suite à un important incendie sur l'île qui s'est déclenché le 16 janvier 2025.
- Stations **UNM** (Mexique) et **SPB** (Brésil), maintenances effectuées en juin 2024 et octobre 2024. A UNM, amélioration de l'installation GPS et calcul de la sensibilité des capteurs STS-1. A SPB, réparation de la transmission et amélioration du fonctionnement des STS-1.
- Creation of the new **MATO** station in western Brazil : during the years 2022-2024, the site was selected and prepared in collaboration with our Brazilian partners at the University of Sao Paulo, and the 24-meter well was drilled by a local company. The new station was installed in October 2024. The well was instrumented with a new-generation T360 (Nanometrics) sensor. The data are of very high quality and are received in real time at IPGP. This station fits in particularly well with the GEOSCOPE Observatory's missions, thanks to its isolated location, at a distance from existing very broadband stations.
- French Southern and Antarctic Lands, winter 2024 : Maintenance operations on the Kerguelen (**PAF**), Crozet (**CRZF**) and Amsterdam (**AIS**) sites. Drilling of a new 30-meter well at Concordia base (CCD) in Antarctica. However, the AIS station is shut down for an undetermined period of time following a major fire on the island on January 16, 2025.
- **UNM** (Mexico) and **SPB** (Brazil) stations, maintenance carried out in June 2024 and October 2024. At UNM, improvement of the GPS installation and calculation of the sensitivity of the STS-1 sensors. At SPB, transmission repairs and improved STS-1 operation.



Nouvelle station **MATO** (Brésil), octobre 2024. Vue générale du site (à gauche) et vue du capteur T360 avant installation dans le puits de 24m de profondeur (à droite).

New **MATO** station (Brazil), October 2024. General view of the site (left) and view of the T360 sensor before installation in the 24m deep well (right).

■ 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 2024, 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 trois capteurs T360 de cave récemment installés aux stations TAM (Algérie), ECH (Alsace) et SANVU (Vanuatu), 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 only networks in the world to provide very broadband data up to periods of 360 seconds and beyond. In 2024, GEOSCOPE continued to acquire new-generation seismometers, with the purchase of two Trillium T360s. These sensors will be installed in the stations most threatened by the ageing of the STS-1s, as well as in the new stations planned. Unlike their predecessors, these seismometers integrate their three components in a single enclosure that no longer requires vacuum sealing, simplifying installation and maintenance. The three T360 vault sensors installed at the TAM (Algeria), ECH (Alsace) and SANVU (Vanuatu) stations, as well as the two T360 well sensors installed at the SOK (Senegal) and MATO (Brazil) stations, are showing excellent performance, validating this development.



Travaux sur deux stations équipées de capteurs STS-1. A gauche, station **UNM** (Mexique, juin 2024), à droite, station SPB (Brésil, octobre 2024). A droite, le cache d'un des trois capteurs STS1 a été retiré, rendant le capteur visible/



Work on two stations equipped with STS-1 sensors. Left, **UNM** station (Mexico, June 2024), right, SPB station (Brazil, October 2024). On the right, the cover of one of the three STS1 sensors has been removed, making the sensor visible.



■ Conseil scientifique Scientific Advisory Board

La réunion biannuelle du conseil scientifique a eu lieu les 11 et 12 juin 2024. Le conseil a souligné l'importance du réseau GEOSCOPE et aussi contribué à l'amélioration des données, en particulier en mentionnant quelques stations dont les données ou métadonnées pourraient être améliorées. Il a aussi mentionné l'importance de la collaboration entre ingénieurs des différents réseaux large-bande, en vue d'échanger sur les meilleures pratiques d'instrumentation ou de gestion des données.

The biannual meeting of the Scientific Advisory Board took place on June 11 and 12, 2024. The board underlined the importance of the GEOSCOPE network and also contributed to data improvement, in particular by mentioning a few stations whose data or metadata could be improved. It also mentioned the importance of collaboration between engineers from different broadband networks, with a view to exchanging best practices in instrumentation or data management.

■ Validation des données et suivi de la diffusion des produits dérivés mis en place par l'observatoire Validation of data and monitoring of the derived products set up by the observatory

Toutes les données disponibles de l'année 2023 ont été récupérées, vérifiées et transmises au centre de données de l'IPGP. Les informations sur les séismes récents sont maintenant diffusées sur le compte bluesky @geoscope-ipgp, en remplacement de la diffusion par X/twitter.

All available data for the year 2023 have been retrieved, verified and transmitted to the IPGP data center. Information on recent earthquakes is now broadcast on the bluesky @geoscope-ipgp account, replacing the X/twitter broadcast.

En savoir plus / Read more :

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

Compte Bluesky / Bluesky Account 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

■ **L'île volcanique de la Guadeloupe : un laboratoire naturel idéal pour étudier le fractionnement des isotopes du Li lors des diverses interactions eau-roche**
The volcanic island of Guadeloupe : an ideal natural laboratory to investigate Li isotopes fractionation during different water-rock interactions

Le rapport isotopique du Li est devenu un puissant indicateur des réactions d'altération des silicates. Il est principalement contenu dans les minéraux silicatés et lors des interactions eau-roche, ses isotopes sont fortement fractionnés. La solution d'altération est enrichie en isotope lourd ^7Li tandis que l'isotope léger ^6Li est préférentiellement retenu par les minéraux d'altération secondaire (tels que les argiles). En conséquence, la phase dissoute des rivières a des valeurs de composition isotopique du Li ($\delta^7\text{Li}$) supérieures à celles des roches mères. Des études expérimentales ont montré qu'aucun fractionnement des isotopes du Li n'est observé lors de la dissolution des minéraux, contrairement à la précipitation du Li dans les minéraux d'altération secondaire et à l'adsorption du Li sur les surfaces argileuses. Des expériences en laboratoire ont également montré que le coefficient de fractionnement isotopique est inversement corrélé à la température lors de la formation de minéraux secondaires contenant du Li. D'autres paramètres susceptibles d'influencer le fractionnement isotopique du Li sont le temps de séjour des minéraux et de l'eau dans le régolithe.

L'île volcanique de la Basse-Terre est un laboratoire naturel idéal pour étudier les différents types de fractionnement isotopique du Li résultant de l'altération chimique des andésites ($\delta^7\text{Li}$ homogène $\sim 5\text{‰}$). L'étude des rivières de l'île permet d'observer la relation entre le fractionnement isotopique du Li et le degré d'altération chimique de la roche mère. Une autre caractéristique importante de l'île volcanique est que l'altération hydrothermale à haute température génère des formes minérales secondaires différentes de celles formées dans un contexte à basse température (ex : smectites, zéolites, illites, chlorites). À haute température, le fractionnement

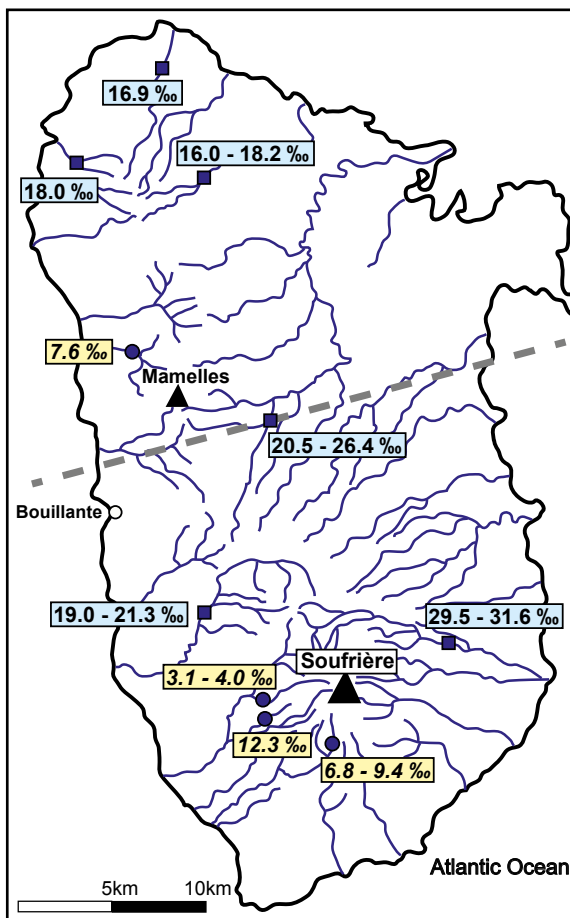
The Li isotope ratio has developed as a powerful proxy for silicate weathering reactions. Lithium is mainly hosted in silicate minerals and during water-rock interactions, Li isotopes are highly fractionated. The solution is enriched in the heavy isotope ^7Li whereas the light isotope ^6Li is preferentially re-tained by secondary alteration minerals (such as clays). As a result, the dissolved load of rivers have Li isotope composition ($\delta^7\text{Li}$) values higher than the parent rocks. Experimental studies have pointed out that no Li isotopes fractionation is observed during mineral dissolution, unlike the precipitation of Li in secondary alteration minerals and the adsorption of Li onto clay surfaces. Laboratory experiments have also shown that the isotopic fractionation factor inversely correlates with temperature during the formation of Li bearing secondary minerals. Other parameters likely to influence the Li isotopic fractionation are the residence time of minerals and water in the regolith.

The volcanic island of Basse-Terre is an ideal natural laboratory to investigate the different Li isotopes fractionations resulting from the chemical weathering of an andesitic lithology ($\delta^7\text{Li}$ homogenous $\sim 5\text{‰}$). Studying the rivers of the island enable us to investigate the relationship between the Li isotopic fractionation and the degree of chemical weathering of the parent rock. Another important feature of volcanic context is that high-temperature hydrothermal alteration generates different secondary mineral forms compared to a low-temperature context (e.g. smectites, zeolites, illites, chlorites). At high temperature, Li isotope fractionation is limited and the hydrothermal minerals have a $\delta^7\text{Li}$ ratio close to that of fresh volcanic rock. The presence of such high-temperature neo-formed minerals in altered rocks of the exhumed or active geothermal systems on the Basse-Terre Island can influence the $\delta^7\text{Li}$ ratio of some rivers.

isotopique du Li est limité et les minéraux hydrothermaux ont un rapport $\delta^7\text{Li}$ proche de celui de la roche volcanique fraîche. La présence de tels minéraux néoformés à haute température dans les roches altérées des systèmes géothermiques exhumés ou actifs de l'île de la Basse-Terre peuvent influencer le rapport $\delta^7\text{Li}$ de certaines rivières.

Nous observons une remarquable variabilité des concentrations en Li et des valeurs de $\delta^7\text{Li}$ dans les rivières de cette petite île volcanique (Fig. 1). Les rivières affectées par les apports hydrothermaux sont les plus concentrées et isotopiquement les plus légères (de 3,1 à 12,3 ‰), faisant du rapport isotopique $\delta^7\text{Li}$ un outil de prospection géothermique potentiellement utile. Inversement, les rivières non impactées par les apports hydrothermaux sont plus diluées et isotopiquement plus lourdes (16,0 à 31,6 ‰), mettant en évidence des processus et des degrés d'altération différents. Cette variation est liée à l'âge du substratum, à l'épaisseur du régolithe et à des paramètres géomorphologiques tels que l'élévation et la pente des bassins versants.

We observe a remarkable variability of the Li concentrations and $\delta^7\text{Li}$ values in rivers of this small volcanic island (Fig. 1). The rivers affected by hydrothermal inputs are the most concentrated and isotopically lighter (from 3.1 to 12.3 ‰), making the $\delta^7\text{Li}$ isotopic ratio a potentially useful geothermal prospecting tool. Inversely, the rivers not impacted by hydrothermal inputs are more diluted and isotopically heavier (16.0 to 31.6 ‰), highlighting different processes and degrees of weathering. This variation is linked to substratum age, regolith thickness and geomorphologic parameters such as elevation and slope of the watersheds.



Carte de la composition isotopique en lithium des rivières de l'île de la Basse-Terre (rivières influencées par l'altération hydrothermale en jaune et les autres rivières en bleu). L'âge du substratum varie entre 4,3 et 1,2 Ma dans le nord (au dessus de la ligne pointillée) et est $\leq$ 900 ka dans le sud (Samper *et al.*, 2007). © C. Dessert

Map of the dissolved lithium isotopic composition of rivers of the Basse-Terre Island (river waters affected by hydrothermal alteration are represented in yellow and other rivers in blue). The substratum ages range from 4.3 to 1.2 Myrs in the North (above the dotted line) and are $\leq$ 900 kyrs in the South (Samper *et al.*, 2007). © C. Dessert



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 l'enregistrement de leur sismicité régionale et de l'évaluation des aléas potentiels associés de formation de tsunamis, à travers ses observatoires volcanologiques et sismologiques (OVS) et son équipe à Paris :

- l'OVS-IPGP est en charge de la Soufrière de Guadeloupe
- l'OVS-IPGP est en charge de la Montagne Pelée à la Martinique
- l'OVS-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) est opérée par l'IPGP et le BRGM et en partenariat avec le CNRS et l'IFREMER, et 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 deuxième 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 novembre 2024. Cet événement a rassemblé environ 40 personnes sur 2 jours, 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 commencé à travailler pour apporter de nouvelles fonctionnalités à l'outil WebObs, code communautaire labellisé par l'INSU au cœur des observatoires

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

- the OVS-IPGP is in charge of the Soufrière de Guadeloupe
- the OVS-IPGP is in charge of the Montagne Pelée in Martinique
- the OVS-IPGP is in charge of the Piton de la Fournaise in La Réunion.
- the Volcanological and seismological monitoring network of Mayotte (REVOSIMA), is a national structure operated by IPGP and BRGM in collaboration with CNRS and IFREMER, and 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 for their integration within the Epos-France research infrastructure through the CNRS-INSU's National service for observation in volcanology (SNOV) in the volcano theme.

The second 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 November 2024. This event brought together around 40 people over 2 days, 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 started to work to bring new functionalities to the WebObs tool, a community code recognized by INSU at the heart of the volcanological and seismological observatories.



volcanologiques et sismologiques. Il devrait apporter la possibilité pour les contributeurs d'intégrer facilement des codes en Python à WebObs.

Au cours de l'année, une réunion du comité d'experts en volcanologie de l'IPGP (CEV) s'est déroulée pour réfléchir aux questions suivantes et proposer un avis à la direction de l'IPGP :

- Évaluation de l'évolution de l'activité et de la réactivation de la Soufrière de Guadeloupe.

He should bring the possibility for contributors to seamlessly integrate Python code to WebObs.

During the year, one meeting of the IPGP's Committee of Experts in Volcanology (CEV) was held to consider the following issue and propose an advice to the IPGP's Director's Office :

- Assessment of activity and unrest status at La Soufrière de Guadeloupe.

Activités en 2024

Activities in 2024

■ Résumé de l'activité au Piton de la Fournaise en 2024

Summary of Piton de la Fournaise activity in 2024

En 2024, aucune éruption n'a eu lieu au Piton de la Fournaise. En revanche suite à la dernière éruption - qui a eu lieu du 2 juillet au 10 août 2023 - deux périodes d'inflation de l'édifice correspondant à une mise en pression du réservoir magmatique superficiel (localisé aux alentours de 1,5-2 km sous la surface) ont été enregistrées en novembre 2023 et février/mars 2024. La deuxième phase d'inflation de février/mars 2024 a été accompagnée d'une augmentation de la sismicité sous les cratères sommitaux avec jusqu'à une quinzaine de séismes volcanotectoniques superficiels (0 à 2,5 km au-dessus du niveau de la mer) par jour.

La mise en pression du réservoir n'a pas été suffisante pour déclencher une injection de magma vers la surface. Depuis avril 2024, l'activité sismique est restée faible sous le Piton de la Fournaise et une légère déflation de l'édifice est enregistrée.

Il faut remonter à 2013 pour connaître une année sans éruption. La dernière période de pause marquante du volcan sans éruption avait duré 1288 jours entre le 10/12/2010 et le 20/06/2014.

Les périodes de repos ne sont pas rares dans l'histoire récente du Piton de la Fournaise. En effet l'activité volcanique n'est pas continue mais présente des fluctuations majeures à l'échelle décennale avec des cycles éruptifs entrecoupés de plusieurs années sans éruption.

Piton de la Fournaise did not erupt in 2024. However, following the last eruption - which occurred between July 2 and August 10, 2023 - two periods of edifice inflation were recorded in November 2023 and February/March 2024, corresponding to a pressure increase in the shallow magma reservoir (located around 1.5-2 km below the surface). The second phase of inflation in February/March 2024 was accompanied by an increase in seismicity below the summit craters, with up to fifteen surface volcanotectonic earthquakes (0 to 2.5 km above sea level) per day.

The reservoir was not pressurized enough to trigger the injection of magma towards the surface. Since April 2024, seismic activity has remained low beneath Piton de la Fournaise and a slight edifice deflation has been recorded.

The last year without an eruption was 2013. The volcano's last significant break without eruption lasted 1,288 days between 10/12/2010 and 20/06/2014.

Periods of rest are not uncommon in the recent history of Piton de la Fournaise. In fact, volcanic activity is not continuous but shows major fluctuations on a decadal scale, with eruptive cycles interrupted by several years without an eruption.



Grâce à l'étude des rapports du Strontium (Sr) dans les laves, *Vlastélic et al.*, (2018) ont montré que ces cycles éruptifs étaient liés à la zone de fusion profonde. Chaque cycle correspond ainsi à la vidange du matériel mantellique à un endroit donné jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de matériel fertile. Ainsi en début de cycle les laves présentent des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ élevés témoins de la fusion de domaines fertiles alors qu'en fin de cycle les laves présentent des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus faibles témoins de l'extraction des liquides de matrice réfractaire. Les baisses des rapports du Sr au cours d'un cycle éruptif refléteraient l'épuisement de matériel fusible (point de fusion bas) dans la source.

L'étude des rapports du Sr des laves émises lors de la dernière éruption (2 juillet – 10 août 2023) montre des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ extrêmement faibles (*Vlastélic*, communication personnelle), compatibles avec l'hypothèse d'une fin de cycle éruptif.

Conséquence du cyclone Belal sur les infrastructures de l'OVPF-IPGP

Le 15 janvier 2024, l'île de La Réunion était impactée par le passage du cyclone Belal avec le passage de l'œil du cyclone sur la partie Est de l'île et des rafales de vent jusqu'à 217 km/h sur les reliefs (alerte rouge sur tout le territoire de La Réunion du 14 janvier 20h au 16 janvier midi, incluant une alerte violette le 15 janvier de 6h à 13h).

By studying the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations in the lavas, *Vlastélic et al.*, (2018) showed that these eruptive cycles were linked to the rate of mantle melt supply. Each cycle corresponds to the emptying of mantle material at a given location until there is no more fertile material. At the beginning of the cycle, the lavas display high $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios, reflecting the melting of fertile domains, whereas at the end of the cycle the lavas display lower $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios, reflecting the extraction of refractory matrix liquids. The decreases in Sr ratios during an eruptive cycle would reflect the exhaustion of fusible material (low melting point) in the source.

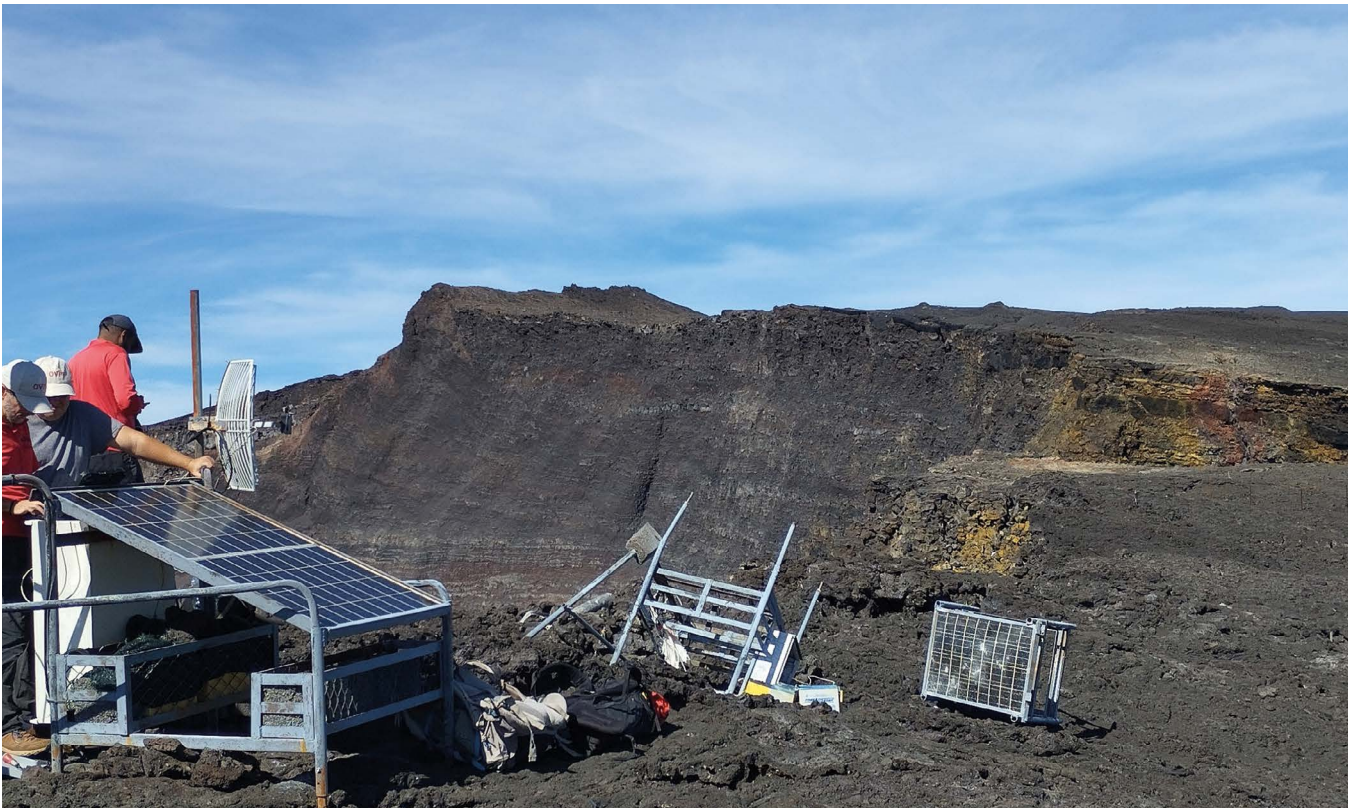
The Sr ratios of the lavas emitted during the last eruption (July 2 - August 10, 2023) shows extremely low $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (*Vlastélic*, personal communication), compatible with the hypothesis of the end of an eruptive cycle.

Impact of cyclone Belal on OVPF-IPGP infrastructure

On January 15, 2024, La Réunion was hit by cyclone Belal, with the cyclone eye passing over the eastern part of the island and wind gusts of up to 217 km/h over the reliefs (red alert for the whole of La Réunion from January 14 8pm to January 16 midday, including a violet alert on January 15 from 6am to 1pm).



Station de l'OVPF-IPGP détruite par le passage du cyclone Belal au sommet du Piton de la Fournaise le 15/01/2024.
OVPF-IPGP station destroyed by Cyclone Belal at the summit of Piton de la Fournaise on January 15, 2024.



Station de l'OVPF-IPGP détruite par le passage du cyclone Belal au sommet du Piton de la Fournaise le 15/01/2024.

OVPF-IPGP station destroyed by Cyclone Belal at the summit of Piton de la Fournaise on January 15, 2024.

- Les coupures d'électricité, d'eau et de téléphonie 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 en distanciel pendant le cyclone et jusqu'au retour du réseau électrique le 19 janvier. Le retour à la normale de tous les réseaux de fluides s'est fait le 23 janvier. À l'intérieur des bâtiments, quatre bureaux ont subi des dégâts et des infiltrations d'eau 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 a subi de nouveaux dégâts et nécessiterait une réfection (estimation des coûts 72 000 euros)
- Sur le terrain, lors du passage du cyclone sur le volcan, l'OVPF-IPGP a perdu le lien avec une grande partie de son réseau. Le 16 janvier midi, à la levée de l'alerte rouge, étaient hors service ou inaccessibles :
 - > 70 % des stations sismiques,
 - > 50 % des stations GNSS,
 - > 66 % des stations inclinométriques,
 - > 33 % des stations extensométriques,
 - > 50 % des stations de géochimie,
 - > 55 % des webcams.
- The power, water and telephone cuts had an impact on the observatory's operations, but the automatic backup provided by the generator enabled remote monitoring activities to continue during the cyclone and until the power was restored on January 19. All fluid networks returned to normal on January 23. Inside the buildings, four offices suffered damage and water infiltrations, 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, suffered further damage and will need to be repaired (estimated cost : 72,000 euros).
- In the field, during the cyclone's passage over the volcano, the OVPF-IPGP lost contact with a large part of its network. At midday on 16 January, when the red alert was lifted, the following were out of service or inaccessible :
 - > 70 % of seismic stations,
 - > 50 % of GNSS stations,
 - > 66 % of inclinometer stations,
 - > 33 % of extensometer stations,
 - > 50 % of geochemistry stations,
 - > 55 % of webcams.



Malgré cela l'OVPF-IPGP a réussi à maintenir une surveillance opérationnelle minimale de l'activité volcanique tout au long du cyclone, malgré un « mode dégradé ».

Le 17 janvier, avec la remise en état du réseau 4G, les données d'une grande partie des stations transitant par un relai de l'observatoire situé au sud-est de l'île étaient de retour.

Le 18 janvier, une mission hélicoptérée d'une équipe de l'OVPF-IPGP a permis de constater un fort impact du cyclone sur les stations de l'OVPF-IPGP situées au sommet et sur le pourtour de la caldera de l'Enclos Fouqué (à savoir les zones qui ont été exposées aux vents les plus forts). Deux stations ont été totalement détruites, une partiellement, et de nombreux instruments de surveillance étaient HS.

Le 21 janvier, 6 jours après le passage du cyclone, grâce à la forte mobilisation sur le terrain et à l'expertise des équipes de l'OVPF-IPGP, 75 % du réseau de surveillance du Piton de la Fournaise était de nouveau opérationnel.

Et le 23 avril, les stations détruites étaient réinstallées sur site. Le coût de la remise en état des stations de surveillance sur le terrain a été estimé à 67 900 euros, pris sur les fonds propres de l'OVPF-IPGP et sur le matériel de remplacement à disposition.

Despite this, the OVPF-IPGP managed to maintain minimal operational monitoring of volcanic activity throughout the cyclone, despite a 'degraded mode'.

On January 17, with the restoration of the 4G network, data from a large number of stations passing through an observatory relay located in the south-east of the island was back.

On January 18, a helicopter-borne mission by an OVPF-IPGP team showed that the cyclone had had a major impact on the OVPF-IPGP stations located at the summit and around the Enclos Fouqué caldera (i.e., the areas exposed to the strongest winds). Two stations were totally destroyed, one partially, and many monitoring instruments were out of order.

On January 21, 6 days after the cyclone, thanks to the strong mobilization in field and the expertise of the OVPF-IPGP teams, 75% of the Piton de la Fournaise monitoring network was once again operational.

And on April 23, the stations destroyed were reinstalled in the field. The cost of restoring the monitoring stations in the field was estimated at 67,900 euros, taken from the OVPF-IPGP's own funds and the available spare equipment.

En savoir plus / Read more :

Les détails sur l'activité du Piton de la Fournaise 2024 sont à retrouver dans les communiqués et les bulletins mensuels de l'OVPF-IPGP / Details on the Piton de la Fournaise 2024 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

Références / References :

Vlastélic, I., A. Di Muro, P. Bachèlery, L. Gurioli, D. Auclair, A. Gannoun (2018), **Control of source fertility on the eruptive activity of Piton de la Fournaise volcano**, La Réunion, Scientific reports, 8(1), 14478.



Mayotte Mayotte

Bien que la dernière activité sous-marine observée au niveau du volcan Fani Maoré remonte au 18 janvier 2021 lors de la campagne MAYOBS 17, des émissions de fluides sous forme de gouttelettes de CO₂ liquide d'origine mantellique profonde localisées dans la zone du Fer à Cheval, 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 dernière est surveillée en continu par l'OVPF-IPGP.

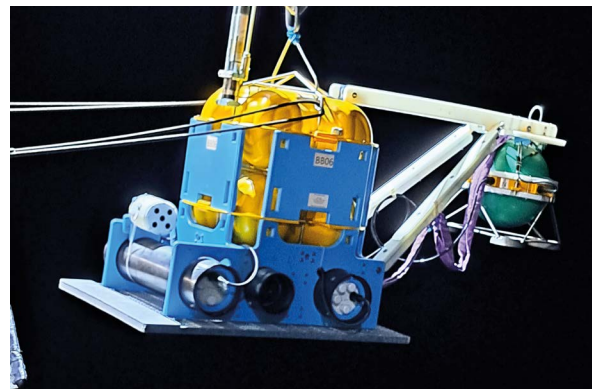
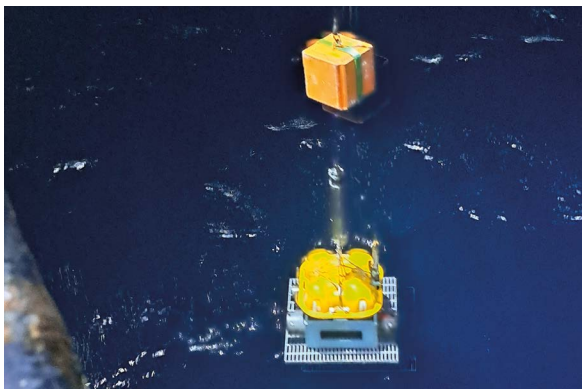
En 2024, l'IPGP a organisé trois campagnes en mer pour la surveillance de l'activité sismo-volcanique à Mayotte.

- Du 25 mars au 1 avril 2024 (MAYOBS 27) : le patrouilleur austral des TAAF Osiris II a permis la relève, la maintenance et le redéploiement des sismomètres de fond de mer (OBS) qui renforcent le réseau sismique à terre.
- Du 14 au 18 juillet 2024 (MAYOBS 29) : le patrouilleur austral des TAAF Osiris II devait permettre le déploiement de 3 sismomètres large-bande de fond de mer (OBS) de nouvelle génération avec une capacité de communication d'échantillons de données par modem acoustique. Malheureusement des problèmes techniques n'ont pas permis ce déploiement et la communication avec la seule station déployée a été perdue.
- Du 16 septembre au 10 octobre 2024 (MAYOBS30), une campagne de surveillance a été menée à bord du navire océanographique Marion Dufresne. 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 CO₂ liquide sur le fond-marin au niveau de la zone du Fer à cheval, d'effectuer des prélèvements (eau, roches), de récupérer les données géophysiques et de maintenir opérationnel les différents réseaux sous-marins de surveillance et leurs capteurs.

Although the last underwater activity observed at the Fani Maoré volcano dates back to January 18, 2021 during the MAYOBS 17 campaign, local fluid emissions in the form of liquid CO₂ droplets of deep mantle origin, in the Fer à Cheval area, 10 km off the coast of Mayotte, are still ongoing, as is seismic activity located between 5 and 50 km to the east of the island. This seismic activity is continuously monitored by the OVPF-IPGP.

In 2024, the IPGP organized three sea campaigns to monitor seismo-volcanic activity in Mayotte.

- From March 25 to April 1, 2024 (MAYOBS 27): 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 July 14 to 18, 2024 (MAYOBS 29): the TAAF southern patrol vessel Osiris II was used to deploy 3 new-generation broadband ocean bottom seismometers (OBS) with the capacity to communicate data samples by acoustic modem. Unfortunately, technical problems prevented this deployment and the communication with the only station deployed was lost.
- From September 17 to October 10, 2024 (MAYOBS30), 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 liquid CO₂ 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.



Déploiements d'OBS lors de la campagne océanographique MAYOBS30.
Deployment of OBS during the MAYOBS30 oceanographic campaign.

La campagne en mer de surveillance MAYOBS30 n'a montré aucune évolution morphologique majeure dans la zone du volcan Fani Maoré ou dans la zone du Fer à Cheval (structure préexistante à Fani Maoré située à l'aplomb de l'essai sismique proximal) en 2024. L'analyse préliminaire des données acquises sur les émissions de CO₂ liquide dans le Fer à Cheval a permis d'identifier sans ambiguïté la continuité de l'activité d'émission de fluides de 17 sites déjà observés pendant les 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 atteignent plus de 1000 m dans la colonne d'eau, jusqu'à 250 m de la surface. Une plongée d'une caméra embarquée SCAMPI dans le Fer à Cheval a confirmé qu'il y a toujours de nombreux amas d'hydrate de CO₂, certains de taille métrique et des sites avec des fontaines actives de gouttelettes de CO₂ liquide.

Pour la surveillance opérationnelle 24h/24 et 365j/an, et pour continuer la mise en place d'un réseau de sismomètres de qualité, efficaces et fiables, 3 nouvelles stations sismologiques ont été installées sur les îlots de

The MAYOBS30 campaign did not show any major morphological changes in the Fani Maoré volcano area or in the Fer à Cheval area (a pre-existing structure located directly above the proximal seismic swarm) in 2024. Preliminary analysis of the data acquired on liquid CO₂ emissions in the Fer à Cheval area has unambiguously identified the continuity of fluid emission activity at 17 sites already observed during previous campaigns. No new off-center plumes outside Fer à Cheval could be identified but some plumes had increased their intensity rising up to 1000 m in the water column to a height of 250 below the surface. A SCAMPI on-board camera dive in Fer à Cheval confirmed that there are still numerous clusters of CO₂ hydrate, some of metric size, and sites with active fountains of liquid CO₂ droplets.

Three new seismic stations have been installed on the islets of Handréma, Mogné Amiri and Mbouini to ensure 24/7 operational monitoring, 365 days a year, and to continue the development of a high-quality, efficient and reliable seismometer network. These installations, far from any human activity, will increase the spatial coverage and the quality of



Installation de nouvelles stations sismologiques sur les îlots de Handréma et Mogné Amiri.
Installation of new seismic stations on the islets of Handréma and Mogné Amiri.



Handréma, Mogné Amiri et Mbouini. Ces installations, loin de toute activité anthropique, permettront d'augmenter la couverture géographique et la qualité des signaux enregistrés, et ainsi de mieux identifier les nombreux signaux sismiques générés par l'activité du système volcanique et de mieux localiser la sismicité locale et régionale.

Conséquence du cyclone Chido sur les infrastructures du REVOSIMA

Lors du passage du cyclone intense Chido sur l'île de Mayotte le 14 décembre 2024 qui a dévasté l'île avec une ampleur sans précédent, le REVOSIMA avait perdu la liaison avec la majorité de ses stations de surveillance sur terre à Mayotte et à Grande Glorieuse. Malgré cela le REVOSIMA a pu continuer une surveillance minimale grâce aux données de deux stations sismologiques. Ainsi même si la surveillance se faisait en mode très dégradée, la détection de la sismicité était toujours possible même si elle ne pouvait pas être localisée.

Avec le retour progressif de la 4G et de l'électricité sur l'île, les données d'autres stations sont revenues progressivement jusqu'à début janvier. Au 3 janvier la sismicité était de nouveau localisable. Les réparations réalisées à distance ou avec l'aide du BRGM-Mayotte ont permis d'avoir en date du 17 janvier 2025 un réseau à terre opérationnel à 50 %.

En revanche, plusieurs stations du réseau REVOSIMA ou de ses partenaires ont été complètement détruites lors du passage du cyclone :

- > la station de la plateforme d'observation DZIAN qui avait été installée sur le lac Dziani un mois auparavant,
- > la station sismologique HAND sur l'îlot d'Handréma,
- > la station MT de MOYA,
- > la station GNSS MAYG,
- > la station GNSS MTSA (opérée par Précision Topo).

En mer, le glider a été mis en sécurité en profondeur du 13 au 15 décembre (pas de données au cours de cette période) et a fonctionné en mode dégradé (acquisition limitée) du 15 au 30 décembre pour économiser l'énergie. Il refonctionne en mode nominal depuis le 31 décembre.

the signals recorded, making it possible to better identify the seismic signals generated by the volcanic system activity and to better locate local and regional seismicity.

Impact of cyclone Chido on OVPF-IPGP infrastructure

When the intense cyclone Chido hit Mayotte on December 14, 2024 to cause widespread unprecedented devastation, REVOSIMA lost contact with most of its monitoring stations on land in Mayotte and Grande Glorieuse. Despite this, REVOSIMA was able to continue minimal monitoring thanks to data from two seismic stations. So even if monitoring was carried out in very degraded mode, earthquake detection was still possible even if it could not be located.

With the gradual return of 4G and power on the island, data from other stations gradually returned until early January. By January 3, the seismic activity could once again be located. Repairs carried out remotely or with the help of BRGM-Mayotte allowed the onshore network to be 50% operational on January 17 2025.

However, several stations belonging to the REVOSIMA network or its partners were completely destroyed by the cyclone :

- > the DZIAN observation platform station, which had been installed on Lake Dziani a month earlier,
- > the HAND seismic station on the islet of Handréma,
- > the MOYA MT station,
- > the MAYG GNSS station,
- > the MTSA GNSS station (operated by Precision Topo).

At sea, the glider was secured at depth from December 13 to 15 (no data during this period) and operated in degraded mode (limited acquisition) from December 15 to 30 to save energy. It has been operating in nominal mode from December 31.

En savoir plus / Read more :

Les détails sur l'activité de Mayotte 2024 sont à retrouver dans les communiqués et les bulletins mensuels de du REVOSIMA / Details on the Mayotte 2024 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

La Guadeloupe et sa région ont connu en 2024 une activité sismique soutenue : l'OVSG-IPGP a enregistré plus de 7000 séismes volcaniques sous La Soufrière, dont une vingtaine d'essaims sismiques, et 1894 séismes tectoniques régionaux, dont 1165 (61.5 %) ont pu être localisés. Cette activité tellurique a été l'objet de 25 communiqués relatifs à la sismicité volcanique mais seulement 7 communiqués relatifs à des séismes tectoniques ressentis en Guadeloupe et dans les îles du Nord, ces derniers ayant été moins nombreux en 2024 par rapport aux années précédentes (16 en 2022 et 13 en 2023). Les séismes tectoniques les plus importants se sont produits le 8 mai 2024 à 36 km au nord-nord-ouest de Anse-Bertrand à 17 km de profondeur ($M = 5.4$) et le 15 novembre 2024 à 163 km au nord de Anse-Bertrand à 38 km de profondeur ($M = 5.3$).

Le volcan de La Soufrière a montré en 2024 une activité hydrothermale toujours très soutenue et un régime globalement comparable à celui observé ces dernières années. On note cependant un rebond du régime sismique et de déformation après plusieurs années de baisse (2021-2023). Ce rebond s'est manifesté par (1) une augmentation de 22 % de l'énergie sismique libérée par rapport à 2023 ; (2) une hausse de la pression à l'intérieur du dôme enregistrée par l'écartement des grandes fractures (en particulier la reprise de l'ouverture de la fracture Napoléon – 8 Juillet 1976) et l'accélération de l'ouverture du dôme vu par les stations GNSS. Plus précisément, l'inflexion de régime s'est produite en milieu d'année 2024, avec une activité volcano-tectonique et un régime de déformation nettement plus marqué en seconde partie d'année. La température de la fumerolle Cratère Sud Sud (CSS) s'est maintenue dans la zone des 200°C tout au long de l'année. 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 est entretenu par une pluviométrie encore faible en 2024 au sommet de La Soufrière (3741 mm à la Station Piton Sanner). Plus à l'est et au nord du dôme, des phénomènes instables avec projections majeures de vapeurs et de particules solides se sont produits à l'événement Napoléon Est (le 9 Janvier) et au gouffre Tarissan (le 1^{er} Octobre). Les températures et pression d'équilibre des gaz de la fumerolle Napoléon Nord ont poursuivi leur diminution, se rapprochant des conditions de surface.

In 2024, Guadeloupe and its surrounding region experienced sustained seismic activity : the OVSG-IPGP recorded over 7,000 volcanic earthquakes beneath La Soufrière, including around twenty earthquake swarms, and 1,894 regional tectonic earthquakes, of which 1,165 (61.5%) were located. This seismic activity led to the publication of 25 bulletins on volcanic seismicity, but only 7 on tectonic earthquakes felt in Guadeloupe and the Northern Islands—fewer than in previous years (16 in 2022 and 13 in 2023). The most significant tectonic earthquakes occurred on May 8, 2024, 36 km north-northwest of Anse-Bertrand at a depth of 17 km ($M = 5.4$), and on November 15, 2024, 163 km north of Anse-Bertrand at a depth of 38 km ($M = 5.3$).

La Soufrière volcano exhibited continued intense hydrothermal activity in 2024, with a regime broadly comparable to that observed in recent years. However, a rebound in seismic and deformation activity was observed after several years of decline (2021-2023). This rebound manifested through (1) a 22% increase in seismic energy released compared to 2023, and (2) a rise in internal pressure within the dome, indicated by the widening of major fractures—(particularly the reopening of the Napoléon fracture 8 July 1976)—and the acceleration of dome expansion as observed by GNSS stations. More specifically, this shift occurred around mid-2024, with markedly increased volcano-tectonic activity and deformation in the second half of the year. The temperature of the South-South Crater (CSS) fumarole remained around 200°C throughout the year. In this most active area of La Soufrière, the imbalance between deep heat flux and the amount of water available in the hydrothermal system has persisted since 2023. This imbalance is maintained by continued low rainfall in 2024 at the volcano summit (3,741 mm recorded at the Piton Sanner Station). Further east and north of the dome, unstable phenomena involving major emissions of steam and solid particles occurred at the East Napoléon vent (January 9) and at the Tarissan vent (October 1).

Gas temperatures and equilibrium pressures at the North Napoléon fumarole continued to decrease, approaching surface conditions. In line with the latest electrical tomography imaging of the dome, this trend may indicate an expanding hydrothermal system, more open toward the surface in the northern and eastern parts of the dome—areas where fumarolic activity and ground thermal anomalies have grown and intensified over the past decade.



En accord avec les dernières tomographies électriques du dôme, 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 augmentées 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 (+0.74°C/an depuis 2018 à la source Galion), témoignant du réchauffement lent mais continu du système hydrothermal de la Soufrière. Malgré ces tendances, les signatures des gaz inertes et la sismicité profonde très faible indiquent une stabilité du système magmatique en profondeur. Dans ces conditions, le niveau d'alerte volcanique a été maintenu au niveau de vigilance jaune. Cependant, vu l'augmentation de l'activité fumerolienne au sommet du volcan, la préfecture de Guadeloupe a mis à jour l'arrêté réglementant l'accès aux zones actives, en instituant un périmètre d'interdiction à l'intérieur du périmètre de sécurité (arrêté n°2024-010/CAB/SIDPC du 02 mai 2024). Les concentrations des gaz dans l'air du sommet ($\text{H}_2\text{S}^{\text{max}}$ entre 9 et 200 ppm et SO_2^{max} entre 1.6 et 55 ppm) restant bien au-dessus des limites d'exposition professionnelle sur 8 heures et sur 15 minutes (INRS), l'OVSG-IPGP a décidé d'équiper ses agents d'appareil de protection respiratoire plus protecteurs (masque facial intégral type 3M série 6000 équipé de filtres de classe 2).

Thermal springs located at altitude on the southern flank of La Soufrière continued their long-term warming trend, which began over 25 years ago (+0.74°C/year since 2018 at the Galion spring), reflecting the slow but steady heating of the volcano's hydrothermal system. Despite these trends, the signatures of inert gases and the very low level of deep seismicity indicate a stable magmatic system at depth. As such, the volcanic alert level remained at Yellow Vigilance. However, given the increase in fumarolic activity at the volcano summit, the Prefecture of Guadeloupe updated the decree regulating access to active areas, establishing a restricted perimeter within the broader safety zone (Decree No. 2024-010/CAB/SIDPC of May 2, 2024). Gas concentrations at the summit ($\text{H}_2\text{S}^{\text{max}}$ between 9 and 200 ppm and SO_2^{max} between 1.6 and 55 ppm) remained well above occupational exposure limits over 8 hours and 15 minutes (INRS). Therefore, OVSG-IPGP decided to equip its staff with more protective respiratory equipment (full-face respirators of the 3M 6000 series with class 2 filters).



Mesure de la température des fumerolles Napoléon Nord (photo de gauche) et Cratère Sud Nord (droite - haut) au sommet du dôme de La Soufrière de Guadeloupe. Mesure de l'ouverture de la fracture Napoléon, à proximité du gouffre Tarissan, au sommet du dôme de La Soufrière (droite - bas).

Temperature measurement of the Napoléon Nord fumaroles (left photo) and Cratère Sud Nord fumaroles (top right) at the summit of the La Soufrière de Guadeloupe dome. Measurement of the opening of the Napoléon fracture, near the Tarissan vent, at the summit of the dome (bottom right).



En 2024, l'OVSG-IPGP a poursuivi la fiabilisation, l'extension et la modernisation des réseaux de surveillance. L'observatoire a installé et mis en service deux des trois stations sismiques multi-paramètres à bas bruit de fond prévues dans le cadre d'une convention avec le Ministère de la Transition Écologique (MTE). Ces stations installées dans des forages sur les flancs du volcan de La Soufrière produisent en temps réel des données de haute qualité qui renforcent les capacités de surveillance de 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. La dernière version du logiciel WeObs de traitement et visualisation des données a été installée et mise en service. Le soutien du Service National d'Observatoire en Volcanologie (SNOV) de l'INSU-CNRS a permis de maintenir au meilleur niveau opérationnel les équipements analytiques du laboratoire de chimie (spectromètre de masse à source gazeuse et chromatographie ionique) et les instruments de mesure mobiles (analyseur multi-gaz portable, et analyseur du flux de CO₂ dans le sol), ainsi que de remplacer et moderniser les composants des stations sismologiques et sécuriser l'alimentation en énergie des stations distantes connectées par satellite. Sur le volcan, des campagnes de réitération des mesures de flux de CO₂ ont été mises en place, en complément des mesures répétées déjà inscrites dans le programme de surveillance (composition des gaz, des fluides hydrothermaux et des sources chaudes, réseau dense de stations GNSS, extensométrie des fractures).

In 2024, OVSG-IPGP continued its efforts to improve, expand, and modernize its monitoring networks. The observatory installed and commissioned two of the three planned low-noise multi-parameter seismic stations as part of an agreement with the Ministry for Ecological Transition (MTE). These stations, installed in boreholes on the flanks of La Soufrière, now deliver high-quality real-time data that enhance the observatory's monitoring capacity. With continued support from the MTE, the observatory also upgraded its IT infrastructure, improving reliability and adopting modern tools for supervision, backup, and support. The latest version of the Webobs software for data processing and visualization was installed and launched. Support from the National Volcanological Observatory Service (SNOV) of INSU-CNRS helped maintain the chemical lab's analytical instruments (gas-source mass spectrometer and ion chromatography), as well as portable measurement devices (multi-gas analyzer and soil CO₂ flux analyzer) in optimal operational condition. It also enabled the replacement and modernization of components at seismic stations and the securing of power supply at remote, satellite-connected stations. On the volcano, repeated CO₂ flux measurement campaigns were conducted, supplementing ongoing monitoring activities (gas and hydrothermal fluid composition, hot springs, dense GNSS network, fracture extensometry).



Mise en place des nouvelles stations multi-paramètres en forage (sismomètre, inclinomètre, sonde de pression et température) sur les flancs de La Soufrière de Guadeloupe. Photos réalisées sur le site de Parnasse.

Installation of new multi-parameter borehole stations (seismometer, inclinometer, pressure and temperature probes) on the flanks of La Soufrière de Guadeloupe. Photos taken at the Parnasse site.





■ La Montagne Pelée à la Martinique

Mount Pelée in Martinique

Depuis 2019 l'OVSM-IPGP a mis en évidence une augmentation significative de plusieurs observables de l'activité du volcan de la Montagne Pelée qui ont amené 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.

Les observations réalisées par l'OVSM-IPGP sur l'année 2024 montrent globalement une baisse des différents paramètres suivis par rapport à la période 2020-2023. Néanmoins, certains d'entre eux restent encore significativement au-dessus de leur niveau de référence. Ainsi, 736 séismes de type volcano-tectoniques (VT) ont été enregistrés en 2024, soit environ 3 fois plus que le niveau de base établi sur la période 2015-2019 (256 VT/an). Parmi eux, 109 ont pu être localisés et se concentrent, pour la très grande majorité, à moins de 2 km de profondeur sous la partie sommitale du volcan, au niveau du système hydrothermal réactivé depuis 2019.

En outre, l'OVSM-IPGP a enregistré 9 événements sismiques de type longue-période et hybrides en 2024, dont 5 à des profondeurs supérieures à 15 km. Ces événements, qui étaient absents du catalogue de l'observatoire avant 2019, traduisent des circulations de fluides hydrothermaux et/ou magmatiques en profondeur sous l'édifice. Des zones de végétation dégradées dans la zone des Sources Chaudes, suivies notamment par imagerie satellitale, sont toujours visibles en 2024, même si leur périmètre semble s'être réduit. Elles sont associées, pour certaines, à des flux de dégazage de CO₂ au sol mesurés qui sont bien supérieurs à la moyenne du flux d'origine biogénique.

À l'inverse, les mesures de déformation GNSS indiquent que l'inflation sommitale qui avait été observée entre 2021 et 2023 s'est largement atténuée même si un signal rémanent semble toujours présent. Le dégazage à partir des fumerolles sous-marines à faible profondeur proche de Saint-Pierre continue sans changement notable avec essentiellement une émission de CO₂ d'origine magmatique et mantellique ainsi que l'atteste la signature isotopique du carbone et de l'hélium associé.

Concernant l'activité tectonique régionale, elle est restée en 2024 à un niveau relativement équivalent à celui des années précédentes avec 1165 séismes détectés et 815 d'entre eux localisés. Leurs magnitudes n'ont pas excédé 5,6 et seulement 4 de ces séismes ont été ressentis par la population en Martinique, sans dépasser l'intensité III (échelle EMS-98). Cette sismicité se concentre au niveau de l'interface de subduction et notamment au nord-est de la Martinique, dans la

Since 2019, the OVSM-IPGP has identified a significant increase in several indicators of volcanic activity at Mount Pelée, which led the Prefecture of Martinique to raise the volcanic alert level to Yellow – Vigilance in December 2020. This alert level remains in effect today.

Observations made by the OVSM-IPGP during 2024 show an overall decrease in the various monitored parameters compared to the 2020–2023 period. However, some indicators remain significantly above their reference levels. For example, 736 volcano-tectonic (VT) earthquakes were recorded in 2024—about three times higher than the baseline established during 2015–2019 (256 VT/year). Of these, 109 were located and were mostly concentrated at depths of less than 2 km beneath the summit area of the volcano, within the hydrothermal system reactivated since 2019.

In addition, the OVSM-IPGP recorded 9 long-period and hybrid seismic events in 2024, 5 of which occurred at depths greater than 15 km. These events, which were not present in the observatory's catalog before 2019, are indicative of the movement of hydrothermal and/or magmatic fluids deep beneath the edifice. Areas of degraded vegetation in the Sources Chaudes zone, monitored notably through satellite imagery, remain visible in 2024, although their extent appears to have decreased. Some of these areas are associated with CO₂ degassing measured at ground level, which is well above the average biogenic flux.

In contrast, GNSS deformation measurements indicate that the summit inflation observed between 2021 and 2023 has largely subsided, although a residual signal still appears to be present. Degassing from shallow submarine fumaroles near Saint-Pierre continues without significant change, consisting mainly of CO₂ of magmatic and mantle origin, as evidenced by the carbon and helium isotopic signatures.

As for regional tectonic activity, it remained in 2024 at a level relatively consistent with previous years, with 1,165 earthquakes detected and 815 located. Their magnitudes did not exceed 5.6, and only 4 of these earthquakes were felt by the population in Martinique, not exceeding intensity III on the EMS-98 scale. This seismicity is concentrated at the subduction interface, notably northeast of Martinique, in the presumed rupture zone of the historic 1839 earthquake.



zone de rupture supposée du séisme historique de 1839.

En outre, un essaim d'une vingtaine de séismes situé entre 6 et 11 km de profondeur sous la plaine du Lamentin a été enregistré en novembre 2024. Il confirme la présence de failles actives à terre en Martinique qui doivent être mieux étudiées et prises en compte dans l'évaluation de l'aléa sismique.

L'année 2024 a aussi été marquée à l'OVSM-IPGP par un renouvellement significatif de l'équipe, actuellement constituée de 12 personnes.

Jérôme Vergne, physicien du Corps national des astronomes et physiciens (CNAP) occupe depuis le 1^{er} juillet 2024 le poste de directeur de l'OVSM-IPGP. Il succède à Fabrice Fontaine et aux différents directeur·trice·s intérimaires (C. Aubaud, F. Beauducel, G. Carazzo, J. Corbeau, J-B de Chabalière, J-C Komorowski), tous physiciens / physiciennes adjoints / adjointes de l'IPGP, qui ont œuvré au maintien et au développement des activités de l'OVSM-IPGP pendant les près de deux années de la vacance de ce poste.

Anne-Solenne Leygnac a intégré l'OVSM-IPGP au 1^{er} septembre 2024 comme ingénieure d'étude IPGP en CDD (24 mois) avec notamment comme missions de gérer le parc d'instrumentation marine mis en place dans le cadre du projet Interreg PREST, de contribuer aux nombreuses activités techniques de l'OVSM-IPGP et de participer annuellement aux campagnes MAYOBS d'étude et de surveillance du REVOSIMA de Mayotte. Elle succède à Anthony Potier qui assurait une partie de ces fonctions jusqu'en avril 2024.

Arnaud Andrieu, ingénieur d'étude IPGP en CDD avait intégré l'observatoire en septembre 2022. Il occupe depuis mars 2024 le poste de responsable technique de l'OVSM-IPGP, rôle qui était précédemment assuré par Iban Fernandez qui a quitté l'observatoire en juillet 2024.

Enfin, O'Leary Fernandez Gonzalez, directeur du Centre national de recherche en sismologie de Cuba (CENAI), est venu renforcer l'équipe de l'OVSM-IPGP depuis le 1^{er} octobre 2024, pour une durée de 9 mois, dans le cadre d'un contrat de chercheur contractuel financé par le MTE. Son travail vise à ré-évaluer la magnitude de moment de la sismicité instrumentale de la zone des petites Antilles afin d'aboutir à un catalogue homogène en magnitude.

Ce catalogue est un ingrédient crucial pour la réévaluation de l'aléa sismique de la zone dans le cadre du programme ATLAS. Il travaille en étroite collaboration avec Jordane Corbeau, directrice-adjointe de l'OVSM-IPGP, et Claudio Satriano (IPGP) qui a développé l'outil SourceSpec.

Additionally, a swarm of about twenty earthquakes, located between 6 and 11 km deep beneath the Lamentin plain, was recorded in November 2024. This confirms the presence of active onshore faults in Martinique that need further study and should be considered in seismic hazard assessments.

The year 2024 was also marked by a significant renewal of the OVSM-IPGP team, now composed of 12 members. Jérôme Vergne, a physicist within the French National Corps of Astronomers and Physicists (CNAP), has been serving as director of OVSM-IPGP since July 1, 2024. He succeeds Fabrice Fontaine and the various interim directors (C. Aubaud, F. Beauducel, G. Carazzo, J. Corbeau, J-B de Chabalière, J-C Komorowski), all physicists (or deputy physicists) of the IPGP, who ensured the continuity and development of OVSM-IPGP's activities during nearly two years of vacancy in the position.

Anne-Solenne Leygnac joined OVSM-IPGP on September 1, 2024, as a contract research engineer (24-month fixed-term contract) with missions including the management of the marine instrumentation pool deployed under the Interreg PREST project, contributions to OVSM-IPGP's numerous technical activities, and participation in the annual MAYOBS campaigns for the study and monitoring by REVOSIMA in Mayotte. She succeeds Anthony Potier, who had carried out part of these duties until April 2024.

Arnaud Andrieu, a contract research engineer at IPGP, joined the observatory in September 2022. As of March 2024, he holds the position of OVSM-IPGP Technical Manager, a role previously held by Iban Fernandez, who left the observatory in July 2024.

Finally, O'Leary Fernandez Gonzalez, director of Cuba's National Seismological Research Center (CENAI), joined the OVSM-IPGP team on October 1, 2024, for a 9-month period under a research contract funded by the Ministry for the Ecological Transition (MTE). His work aims to re-evaluate the moment magnitudes of instrumental seismicity in the Lesser Antilles region to produce a homogeneous magnitude catalog.

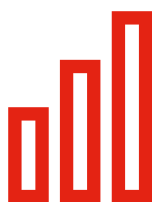
This catalog is a crucial component for reassessing the region's seismic hazard as part of the ATLAS program. He is working closely with Jordane Corbeau, deputy director of OVSM-IPGP, and Claudio Satriano (IPGP), who developed the SourceSpec tool.



L'équipe actuelle de l'OVSM-IPGP au grand complet ! ©A-S. Leygnac.
The current full team of the OVSM-IPGP !

En savoir plus / Read more :

OVPF-IPGP : ipgp.fr/ovpf | **REVOSIMA :** ipgp.fr/revosima | **OVSG-IPGP :** ipgp.fr/ovsg | **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 et diffuser les données produites par les observatoires et issues des travaux de recherche de l'IPGP. Il fournit l'accès aux données à la communauté scientifique nationale et internationale, en soutenant ainsi la recherche en science de la Terre.

Le CD-IPGP assure l'archivage, la conservation à long terme et la diffusion des données d'observation et de recherche, en s'appuyant sur des formats et des interfaces conformes aux standards en vigueur. Il veille également à l'interconnexion avec plusieurs infrastructures de données, qu'elles soient nationales (Epos-France, FormaTerre), européennes (EPOS) ou internationales (FDSN, Planetary Data System de la NASA). Le Centre de données est également responsable de l'attribution d'identifiants numériques pérennes (DOI, Digital Object Identifier) aux réseaux d'observation, données et produits, assurant ainsi leur traçabilité et facilitant leur citation.

Le CD-IPGP gère les données de sept réseaux d'observation, couvrant divers domaines comme la sismologie, la géodésie et la volcanologie. Ces données sont fournies au Centre de données par :

- l'Observatoire GEOSCOPE : réseau global de stations sismologiques large bande ;
- l'Observatoire volcanologique et sismologique de la Guadeloupe : réseau des données sismologiques, accélérométriques, volcanologiques et GNSS ;
- l'Observatoire volcanologique et sismologique de la Martinique : réseau de données sismologiques, accélérométriques, volcanologiques et GNSS ;
- l'Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise : réseau de données sismologiques, volcanologiques et GNSS ;
- le Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA) : réseau de données sismologiques et GNSS ;
- l'Observatoire InSight (2018-2022) : données sismologiques de la mission InSight sur Mars.

The IPGP Data Center (IPGP-DC, <https://datacenter.ipgp.fr>) is responsible for collecting, managing, and disseminating data produced by observatories and research activities at IPGP. It provides access to these data for the national and international scientific community, thereby supporting research in Earth sciences.

The IPGP-DC ensures the archiving, long-term preservation, and dissemination of observational and research data using formats and interfaces compliant with current standards. It also facilitates interconnection with multiple data infrastructures, whether national (Epos-France, FormaTerre), European (EPOS), or international (FDSN, NASA's Planetary Data System). Additionally, the Data Center is responsible for assigning persistent digital object identifiers (DOI) to observation networks, datasets and products, ensuring their traceability and facilitating their citation.

The IPGP-DC manages data from seven observation networks covering various fields such as seismology, geodesy, and volcanology. These data are provided to the Data Center by:

- GEOSCOPE Observatory : a global network of broadband seismic stations
- The Volcanological and Seismological Observatory of Guadeloupe : a network of seismic, accelerometric, volcanological, and GNSS data
- The Volcanological and Seismological Observatory of Martinique : a network of seismic, accelerometric, volcanological, and GNSS data
- The Volcanological Observatory of Piton de la Fournaise : a network of seismic, volcanological, and GNSS data
- The Volcanological and Seismological Monitoring Network of Mayotte (REVOSIMA): a network of seismic and GNSS data
- The InSight Observatory (2018–2022): seismic data from InSight mission on Mars.



Depuis 2022, le CD-IPGP a mis en place un entrepôt de données, IPGP Research Collection (<https://research-collection.ipgp.fr>), visant à préserver, diffuser et valoriser les résultats des activités d'observation et de recherche de l'IPGP. Cet entrepôt facilite l'identification et la citation des données, tout en garantissant leur conformité aux principes "FAIR" (Facile à trouver, Accessible, Interopérable et Réutilisable). La mise en service de cet entrepôt a élargi les missions du CD-IPGP, qui prend désormais en charge l'hébergement et la mise à disposition des données issues de projets scientifiques et de publications dans des revues à comité de lecture.

L'équipe du CD-IPGP est composée de cinq personnes : un chercheur et quatre ingénieurs (3,75 ETP), avec un support administratif assuré par deux gestionnaires.

Le CD-IPGP collabore étroitement avec les observatoires de l'IPGP, le Centre de calcul S-CAPAD et le service informatique de l'Institut.

Les membres du CD-IPGP sont également impliqués dans les réseaux d'ingénieurs Epos-France et FormaTerre.

Since 2022, the IPGP-DC has established a data repository, IPGP Research Collection (<https://research-collection.ipgp.fr>), aimed at preserving, disseminating, and highlighting the outcomes of IPGP's observational and research activities. This repository facilitates data identification and citation while ensuring compliance with FAIR principles (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable). The opening of this service has expanded the IPGP-DC's missions, now including the hosting and distribution of data from scientific projects and publications in peer-reviewed journals.

The IPGP-DC team consists of five members : one researcher and four engineers (3.75 full-time equivalent positions), with administrative support provided by two managers.

The IPGP-DC collaborates closely with IPGP observatories, the S-CAPAD computing center, and the institute's IT department.

IPGP-DC members are also actively involved in the Epos-France and FormaTerre engineering networks.

Activités en 2024 Activities in 2024

IPGP Research Collection

Collection de données "Space Magnetism"

Ouverte en janvier 2024, cette collection regroupe les données et modèles de la mission Swarm. Elle est accessible à l'adresse <https://dataverse.ipgp.fr/dataverse/space-magnetism>.

Jeux de données bathymétriques

Au cours de l'année 2024, six Datasets de bathymétrie produits par le projet Interreg Caraïbe PREST (Plateforme Régionale de Surveillance Tellurique) ont été déposés dans IPGP Research Collection. Ces Datasets sont disponibles dans les collections "OVSM" et "OVSG" :

- <https://dataverse.ipgp.fr/dataverse/OVSM>
- <https://dataverse.ipgp.fr/dataverse/OVSG>

Science ouverte et FAIRDATAITÉ

Le CD-IPGP est membre des groupes de coordination et de pilotage de FAIRDATAITÉ (Université Paris Cité, IPGP, Institut Pasteur – <https://u-paris.fr/science-ouverte/fairdatacite>). Lancé en septembre 2024, ce projet vise à obtenir la

IPGP Research Collection

"Space Magnetism" Data Collection

Opened in January 2024, this collection brings together data and models from the Swarm mission. It is accessible at : <https://dataverse.ipgp.fr/dataverse/space-magnetism>.

Bathymetric Datasets

In 2024, six bathymetry datasets produced by the Interreg Caribbean PREST project (Plateforme Régionale de Surveillance Tellurique) were deposited in the IPGP Research Collection. These datasets are available in the "OVSM" and "OVSG" collections :

- <https://dataverse.ipgp.fr/dataverse/OVSM>
- <https://dataverse.ipgp.fr/dataverse/OVSG>

Open Science and FAIRDATAITÉ

The IPGP-DC is a member of the coordination and steering groups of FAIRDATAITÉ (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



labellisation "Atelier de la donnée" par "Research Data Gouv" (plateforme nationale des données de recherche). Le projet a pour principaux objectifs d'accompagner les personnels dans la gestion des données, de les sensibiliser aux enjeux juridiques et éthiques, de promouvoir les principes FAIR et de structurer le réseau de science ouverte de l'Université et des deux instituts.

Epos-France

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

Le Centre de données IPGP, impliqué dans Résif depuis ses débuts, travaille activement dans la construction d'Epos-France notamment dans les Actions transverses thématiques : Système d'information sismologique et Système d'information GNSS.

À travers ces actions, les données d'observation (sismologiques, volcanologiques, GNSS) dont le CD-IPGP a la gestion, sont intégrées dans les systèmes d'information d'Epos-France et disponibles dans EPOS.

from "Research Data Gouv" (the national research data platform). Its main objectives are to support staff in data management, raise awareness of legal and ethical issues, promote FAIR principles, and structure the open science network within the university and the two institutes.

Epos-France

Launched at the end of 2023, the national research infrastructure Epos-France (<https://www.epos-france.fr>) has succeeded Résif and represents France's participation in the European EPOS platform (<https://www.epos-eu.org>).

The IPGP Data Center, involved in Résif since its inception, is actively contributing to the development of Epos-France, particularly within the thematic cross-cutting actions : Seismological Information System and GNSS Information System.

Through these actions, the observational data (seismological, volcanological, GNSS) managed by IPGP-DC are integrated into the Epos-France information systems and made available within EPOS.

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...)



Space Magnetism

(Institut de physique du globe de Paris)

IPGP Research Collection >

Contact Share

Search this database... Advanced Search

1 to 7 of 7 Results

IT Sort

Dataverses (2)

Datasets (5)

Files (63)

Dataset Category

Research Project (2)

Publication Year

2023 (2)

2024 (4)

2023 (1)

Author Name

Hulot, Gauthier (5)

Chauvet, Louis (4)

Deborde, Robin (2)

Vigneron, Pierre (2)

Alken, Patrick (1)

More...

Subject

Earth and Environmental Sciences (6)

Physics (6)

Astronomy and Astrophysics (5)

Keyword Term

Geomagnetism (4)

Magnetometry (4)

Scientific Satellites (4)

Deposit Date

2023 (2)

2024 (2)

2023 (1)

Swarm Bravo ASM-V data version 06XX

Mar 5, 2023 - Swarm Data

Hulot, Gauthier; Chauvet, Louis; Deborde, Robin, 2023, "Swarm Bravo ASM-V data version 06XX", <https://doi.org/10.18715/IPGP2023.m7ok4rtm>, IPGP Research Collection, V1

This dataset consists of version 06XX 1 Hz (bandwidth 0-0.4 Hz) self-calibrated experimental vector data acquired by the ASM magnetometer on board satellite Bravo of the ESA Swarm mission. These data are produced by IPGP when the ASM instrument is set in its "vector mode", which...

Swarm Alpha ASM-V data version 06XX

Mar 5, 2023 - Swarm Data

Hulot, Gauthier; Chauvet, Louis; Deborde, Robin, 2023, "Swarm Alpha ASM-V data version 06XX", <https://doi.org/10.18715/IPGP2023.m7ok4rtm>, IPGP Research Collection, V1

This dataset consists of version 06XX 1 Hz (bandwidth 0-0.4 Hz) self-calibrated experimental vector data acquired by the ASM magnetometer on board satellite Alpha of the ESA Swarm mission. These data are produced by IPGP when the ASM instrument is set in its "vector mode", which...

Swarm Models (Institut de physique du globe de Paris)

Jan 22, 2024

Swarm Bravo ASM-V data version 050X

Jan 18, 2024 - Swarm Data

Hulot, Gauthier; Chauvet, Louis; Vigneron, Pierre, 2024, "Swarm Bravo ASM-V data version 050X", <https://doi.org/10.18715/IPGP2024.1nrlbde>, IPGP Research Collection, V1

This dataset consists of version 050X 1 Hz (bandwidth 0-0.4 Hz) self-calibrated experimental vector data acquired by the ASM magnetometer on board satellite Bravo of the ESA Swarm mission. These data are produced by IPGP when the ASM instrument is set in its "vector mode", which...

Swarm Alpha ASM-V data version 050X

Jan 18, 2024 - Swarm Data

Hulot, Gauthier; Chauvet, Louis; Vigneron, Pierre, 2024, "Swarm Alpha ASM-V data version 050X", <https://doi.org/10.18715/IPGP2024.1nrlbde>, IPGP Research Collection, V1

This dataset consists of version 050X 1 Hz (bandwidth 0-0.4 Hz) self-calibrated experimental vector data acquired by the ASM magnetometer on board satellite Alpha of the ESA Swarm mission. These data are produced by IPGP when the ASM instrument is set in its "vector mode", which...

Swarm Data (Institut de physique du globe de Paris)

Jan 16, 2024

Swarm ASM-V data produced by IPGP

Swarm climatological models of low- and mid-latitude F-region ionospheric currents

May 2, 2023 - Swarm Models

Fillon, Martin; Hulot, Gauthier; Alken, Patrick; Chulliat, Arnaud, 2023, "Swarm climatological models of low- and mid-latitude F-region ionospheric currents", <https://doi.org/10.18715/IPGP2023.1ddfo4so>, IPGP Research Collection, V1

This dataset provides files and matlab software to take advantage of an empirical climatological model of quiet-time F-region ionospheric currents and associated magnetic fields. The model is designed to accurately represent these currents and fields at low and mid latitudes. It...

Copyright IPGP 2022 | Terms of use

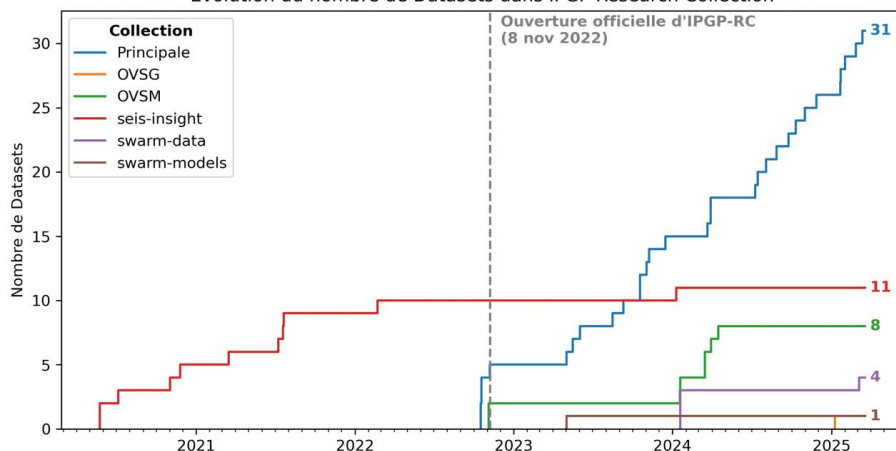


Powered by Dataverse

La collection Space Magnetism dans IPGP Research Collection.

The Space Magnetism collection in the IPGP Research Collection.

Évolution du nombre de Datasets dans IPGP Research Collection



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.

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



90 stations GNSS
90 GNSS stations



7 réseaux de données
sismologiques,
accélérométriques
et volcanologiques
couvrant **198 stations**

7 seismic, accelerometric, and
volcanological data networks
covering **198 stations**



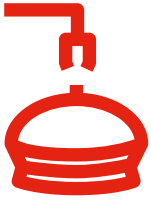
56 jeux de
données déposés
dans l'entrepôt "IPGP
Research Collection"
56 datasets deposited
in the IPGP Research
Collection repository



157 stations diffusant
les données en temps réel
157 stations distributing data
in real-time



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



Service National d'Observation FarSide Seismic Suite FarSide Seismic Suite National Observation Service

Après la fin des opérations d'InSight, en décembre 2022 et avec l'approche de la campagne de lancement de l'expérience FarSide Seismic Suite, en septembre 2026, 2024 a été l'année de transition entre le Service National d'Observation InSight, dissous le 31 décembre 2024 et le Service National d'Observation FSS, créée le 1^{er} Janvier 2024. Le cap de l'équipe est donc maintenant résolument vers la Lune.

Nos activités en 2024 se sont concentrées sur le développement du segment sol et en particulier du logiciel du Lunar Quake Service, qui permettra l'analyse quotidienne des données lunaires. Comme pour la mission InSight, ces données seront pré-traitées par le CNES, à Toulouse, avant d'être envoyées au Centre de données de l'IPGP et à l'équipe du SNO FSS, pour analyse et génération du premier catalogue de sismicité de la Lune depuis la fin du réseau sismique Apollo en 1977. En parallèle de ce développement et avec les données de sismicité lunaire observée durant la mission Apollo, nous avons aussi développé des algorithmes basés sur l'apprentissage numérique et permettant de quantifier de façon probabilistique les activités des séismes profonds de la face visible de la Lune en fonction des phases lunaires.

L'équipe prépare enfin les capteurs de rechanges VBBZ non encore utilisés pour répondre aux futurs appels d'offre, avec l'objectif de contribuer à de nouvelles missions sismiques lunaires. A ce jour en effet, 3 stations sismiques lunaires ont été sélectionnées et devraient donc être déployées en 2026, pour FSS et pour le sismomètre LS de la mission chinoise Chang'E 7, et en 2027 pour le sismomètre LEMS de la mission américaine Artemis 3.

Following the end of the InSight mission in December 2022, and with the upcoming launch campaign of the FarSide Seismic Suite experiment in September 2026, the year 2024 marked a transition between the InSight National Observation Service—officially concluded on December 31, 2024—and the newly established FSS National Observation Service, which began on January 1, 2024. The team's focus is now firmly set on the Moon.

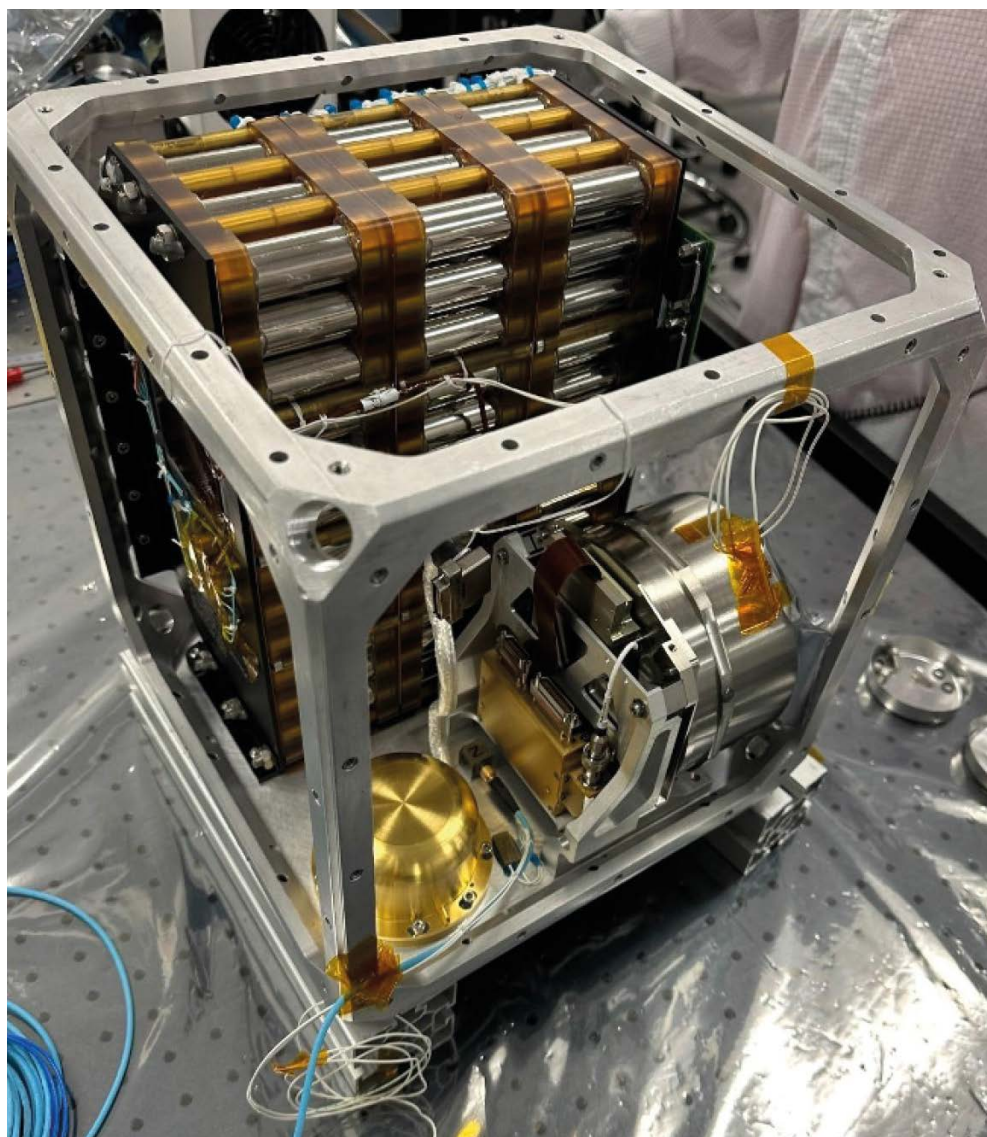
In 2024, our activities were primarily dedicated to the development of the ground segment, particularly the Lunar Quake Service software, which will enable daily analysis of lunar seismic data. As with the InSight mission, these data will be pre-processed by CNES in Toulouse before being sent to the IPGP Data Center and the FSS NOS team for analysis and the creation of the first lunar seismicity catalog since the Apollo seismic network ceased in 1977.

In parallel with this development, and using seismic data recorded during the Apollo mission, we have also developed machine learning-based algorithms to probabilistically quantify the deep moonquake activity on the near side of the Moon in relation to lunar phases.

Lastly, the team is preparing unused spare VBBZ sensors to respond to upcoming calls for proposals, with the aim of contributing to the deployment of new lunar seismic stations. As of today, three lunar seismic stations have been selected and are expected to be deployed: in 2026, for the FSS and the LS seismometer of the Chinese Chang'E 7 mission, and in 2027, for the LEMS seismometer of the American Artemis 3 mission.

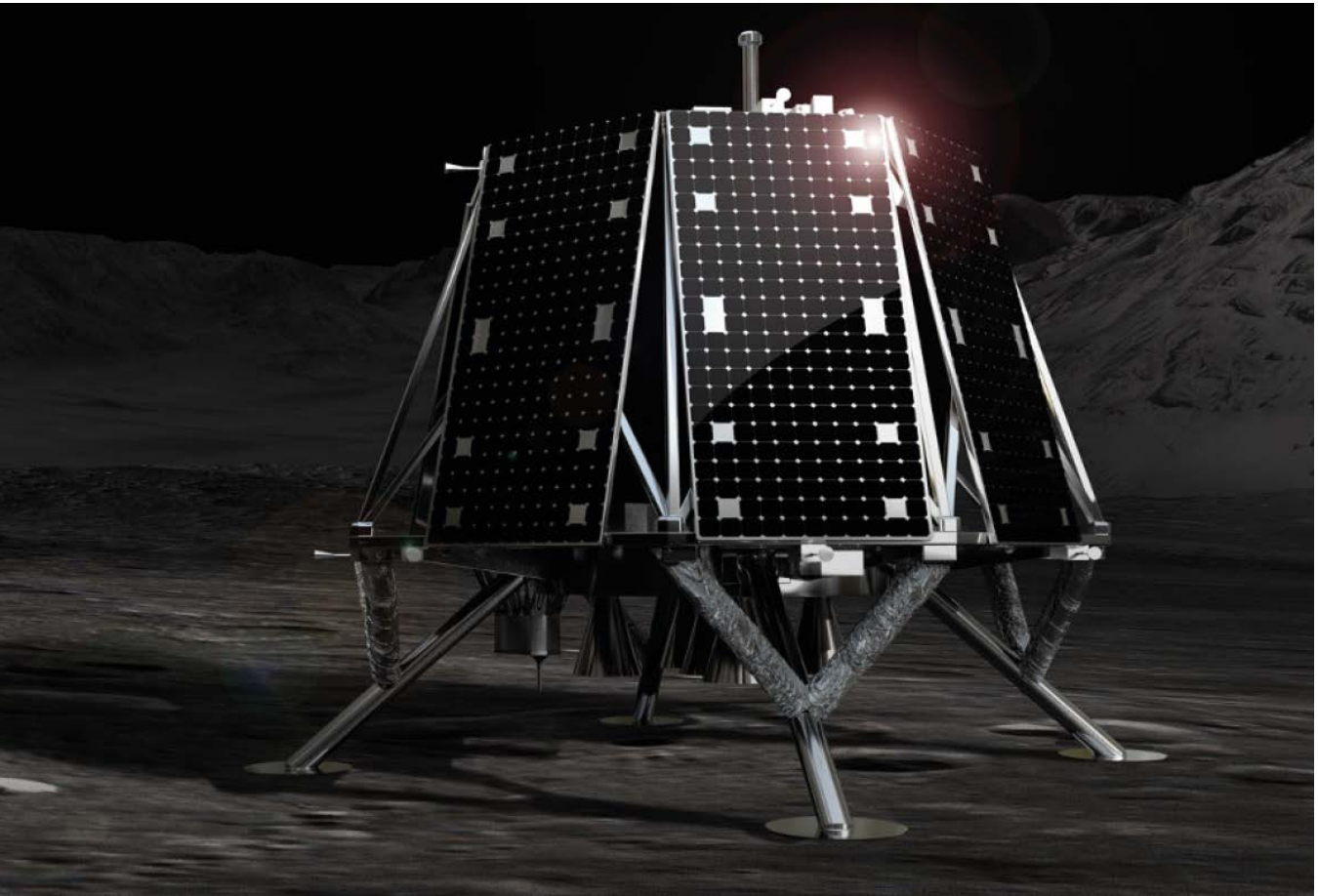
L'IPGP a livré le modèle de vol du capteur VBBZ en mars 2024, seulement 18 mois après la sélection de cette mission. FSS prendra le relais des activités labélisées comme SNO en 2024, avec notamment le développement du logiciel d'exploitation de ses données utilisées par le Lunar Quake Service. Par ailleurs, le projet de sismomètre optique VBB a été finalisé dans le cadre du projet européen PIONEERS, avec une collaboration étroite entre l'IPGP et le CNES en vue de préparer cette nouvelle génération de sismomètre, vingt fois plus sensible que FSS, pour les futures missions avec la JAXA et la NASA.

The IPGP delivered the flight model of the VBBZ sensor in March 2024, just 18 months after the selection of this mission. FSS will take over activities labeled as SNO in 2024, including the development of data processing software used by the Lunar Quake Service. Furthermore, the VBB optical seismometer project was finalized as part of the PIONEERS European project, with close collaboration between the IPGP and the CNES to prepare this new generation of seismometer, twenty times more sensitive than FSS, for future missions with JAXA and NASA.



Intérieur du module autonome FSS. On distingue le capteur 3 axes courtes période, à gauche au premier plan de texture dorée, et le capteur VBBZ dans son boîtier, à droite, ainsi que le pack de batterie permettant au module son fonctionnement durant la nuit.

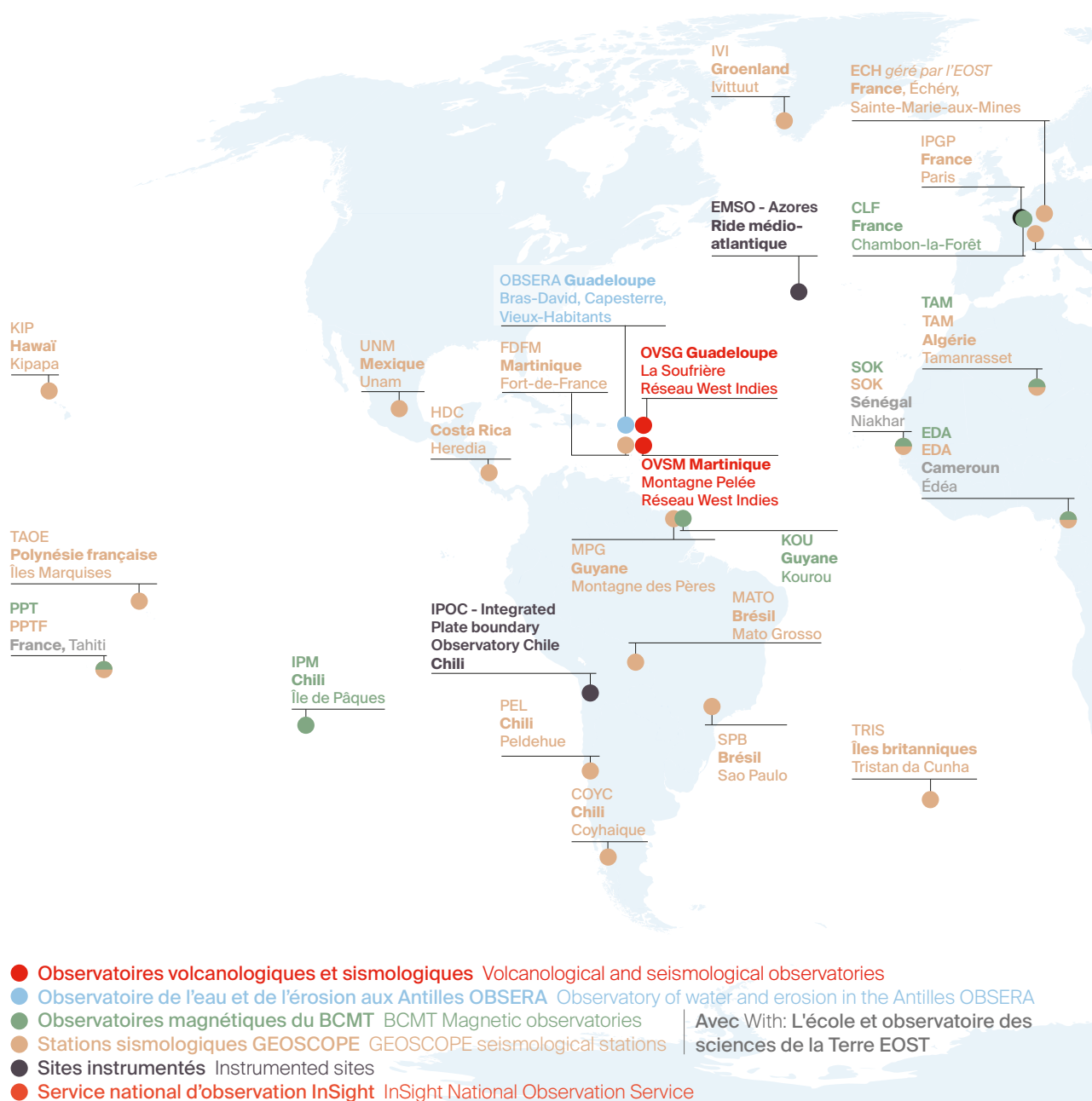
The interior of the autonomous FSS module. Visible are the short-period 3-axis sensor (foreground left, with a golden texture), the VBBZ sensor inside its housing (right), and the battery pack that enables the module to operate during the lunar night.



L'atterrisseur lunaire Draper, qui déploiera le module autonome FSS dans le bassin d'impact de Schrödinger au début de l'automne 2026.
The Draper lunar lander, which will deploy the autonomous FSS module in the Schrödinger impact basin in early fall 2026.

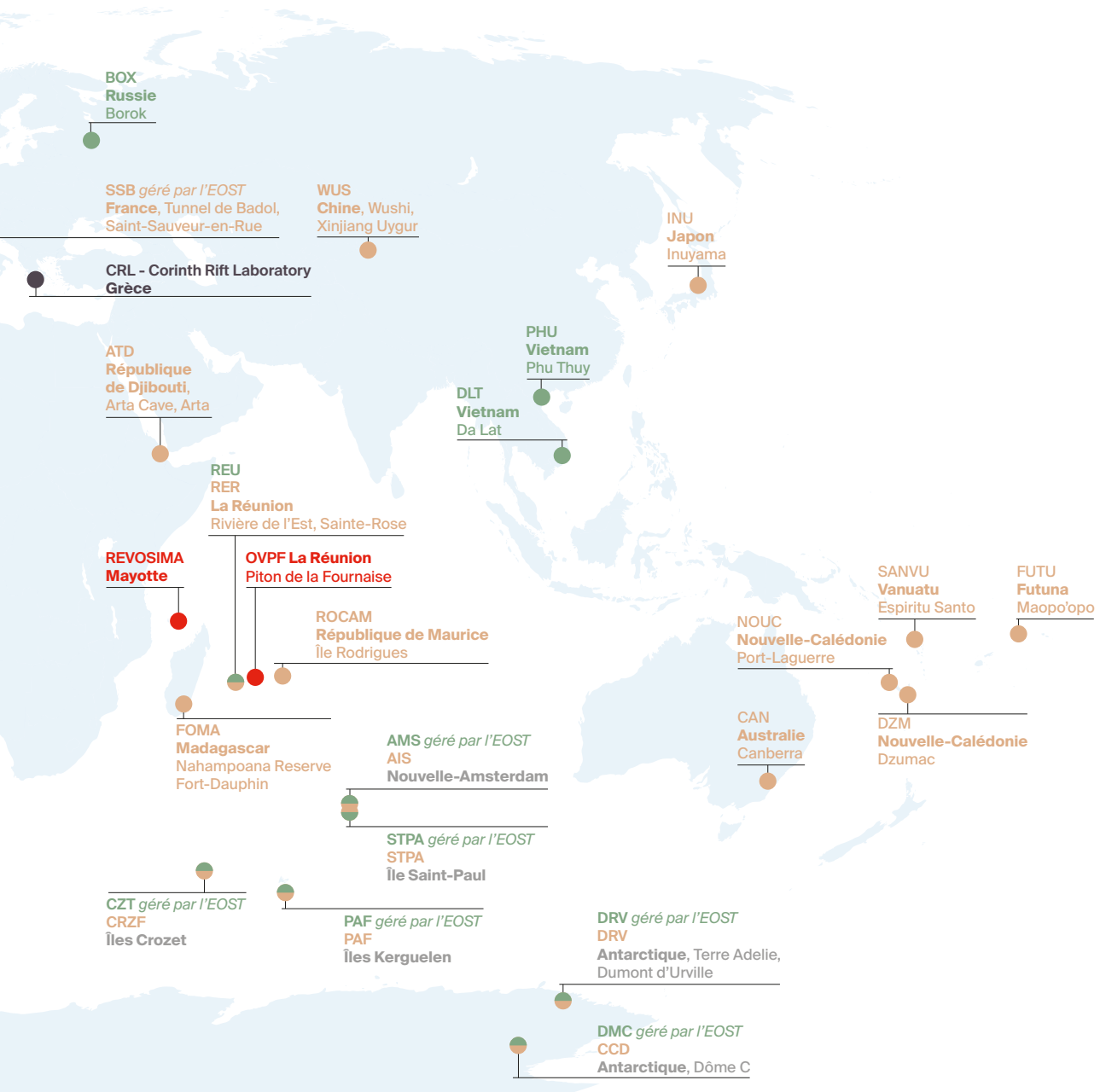


Réseau des observatoires et stations de l'IPGP Network of the IPGP observatories and stations





INSIGHT - Sismomètre SEIS
Planète Mars, Plaine d'Elysium





NanoMagSat, une constellation pour l'étude du champ magnétique terrestre et de l'environnement ionosphérique, se concrétise !

NanoMagSat, a constellation to study the Earth's magnetic field and ionospheric environment, takes shape !

Fort d'une longue tradition d'observation du champ magnétique terrestre depuis le sol et l'espace, l'IPGP a vu une nouvelle étape franchie le 27 Novembre 2024 avec la signature du contrat de mise en œuvre de la future mission Scout NanoMagSat du programme d'observation de la Terre de l'agence spatiale européenne (ESA).

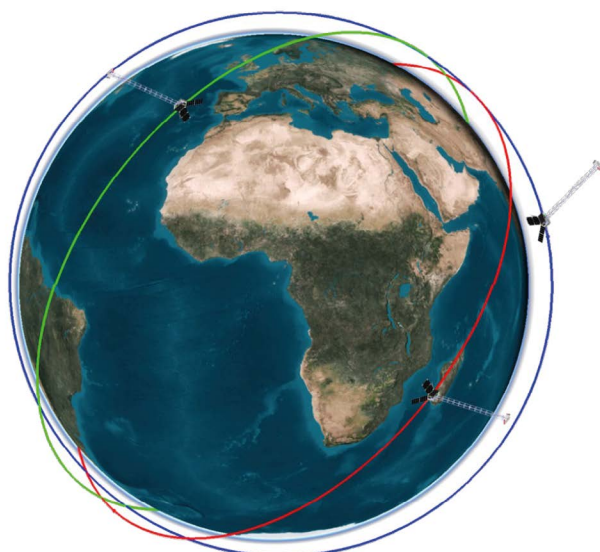
Mieux comprendre la dynamique du champ magnétique terrestre et de l'environnement ionosphérique

Destinée à compléter puis assurer la continuité de la mission Earth Explorer Swarm de l'ESA toujours en opération, la mission NanoMagSat a pour objectif d'améliorer encore notre capacité à caractériser et comprendre la dynamique complexe du champ magnétique terrestre et de l'environnement ionosphérique.

Following a long tradition of observing the Earth's magnetic field from ground and space, the IPGP reached a new milestone on November 27, 2024, with the signing of the contract to implement the future NanoMagSat Scout mission of the European Space Agency (ESA) Earth Observation program.

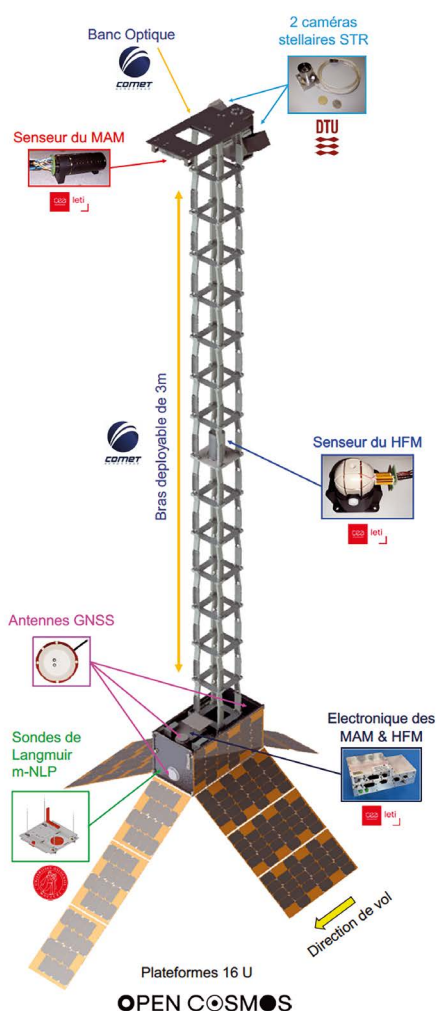
Targeting an improved understanding of the dynamics of the Earth's magnetic field and ionospheric environment

Designed to complement and next take over the still ongoing ESA's Earth Explorer Swarm mission, NanoMagSat aims at further improving our ability to characterize and understand the complex dynamics of the Earth's magnetic field and ionospheric environment.



Les trois satellites NanoMagSat seront lancés à une altitude initiale de 545 km, l'un sur une orbite quasi-polaire (en bleu), les deux autres sur des orbites inclinées à 60°, déphasées en heure locale (en vert et rouge), afin d'assurer une couverture rapide (en environ un mois) des heures locales de l'ensemble des latitudes comprises entre 60°N et 60°S, tout en assurant une bonne couverture des hautes latitudes

The three NanoMagSat satellites will be launched at an initial altitude of 545 km, one on a near-polar orbit (in blue), the other two on orbits inclined at 60° with a local time phase shift (in green and red), to provide rapid coverage (in about a month) of local times for all latitudes between 60°N and 60°S, while ensuring good coverage of high latitudes.



Les trois satellites NanoMagSat sont des cubesats de format 16U d'environ 34 kg, équipés de panneaux solaires et d'un bras, tous déployables. Le magnétomètre vectoriel absolu auto-calibré miniaturisé MAM développé par le CEA-Léti est positionné à l'extrémité du bras sur un banc optique fourni par COMET Aerospace, avec un jeu de caméras stellaires STR fournis par le DTU afin de permettre une restitution d'attitude. Le magnétomètre vectoriel miniaturisé haute fréquence HFM, également développé par le CEA-Léti, est positionné à mi-bras, tandis que le reste de la charge utile (sonde de Langmuir m-NLP fournie par l'Université d'Oslo, récepteurs GNSS Novatel et antennes Tallysman) se trouve sur le corps du satellite. Le bras développé par COMET Aerospace permet d'éviter que les mesures magnétiques ne soient perturbées par le satellite lui-même ou les autres instruments. Pour plus de détails, voir Deconinck *et al.* (2025).

The three NanoMagSat satellites are 16U cubesats weighing around 34 kg, equipped with solar panels and a boom, all of which can be deployed. The miniaturised self-calibrating absolute vector magnetometer MAM developed by CEA-Léti is positioned at the end of the boom on an optical bench provided by COMET Aerospace, with a set of STR stellar cameras supplied by DTU to enable attitude restitution. The miniaturised high-frequency vector magnetometer HFM, also developed by CEA-Léti, is positioned at mid-boom, while the rest of the payload (Langmuir probe m-NLP supplied by the University of Oslo, Novatel GNSS receivers and Tallysman antennas) is on the satellite body. The boom developed by COMET Aerospace ensures that the magnetic measurements are not disturbed by the satellite itself or the other instruments. For more details, see Deconinck *et al.* (2025).



Le champ magnétique terrestre protège notre planète du flux interplanétaire de particules chargées et organise la façon dont l'environnement spatial proche et les couches supérieures ionisées de l'atmosphère réagissent à l'activité solaire. Cette réponse peut produire de forts signaux magnétiques susceptibles d'endommager les infrastructures au sol, comme par exemple les réseaux de transport d'énergie. Elle peut aussi engendrer des risques d'irradiation pour les satellites, ainsi que de multiples perturbations ionosphériques susceptibles de brouiller les transmissions radio, les radars et les systèmes GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites). La surveillance du champ magnétique de notre planète et de son environnement ionosphérique s'avère donc essentielle pour étudier ces phénomènes. Cette surveillance permet aussi de comprendre les sources et l'évolution sur le long terme de ce champ magnétique, d'aider à la navigation, de sonder les propriétés de l'intérieur de la Terre et de la dynamique océanique, et de fournir des informations importantes pour les levés géophysiques.

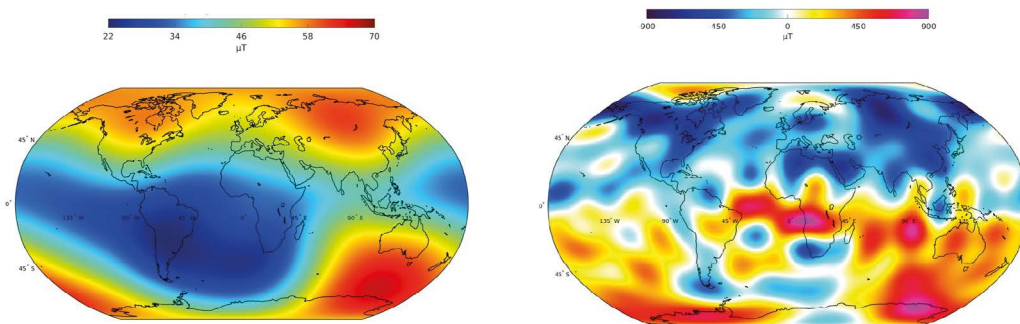
Un projet imaginé dès 2015, concrétisé grâce au CNES et à l'ESA

Déjà engagé dans la mission Earth Explorer Swarm de l'ESA lancée en Novembre 2013, l'IPGP est à l'initiative du projet NanoMagSat. Imaginé dès 2015 avec le CEA-Léti pour compléter la mission Swarm

The Earth's magnetic field protects our planet from the interplanetary flow of charged particles and organizes the way in which the near-space environment and the ionized upper layers of the atmosphere react to solar activity. This response can produce strong magnetic signals potentially damaging ground infrastructures such as power transmission networks. It can also generate radiation hazards for satellites, as well as multiple ionospheric disturbances that may interfere with radio transmissions, radar and GNSS (Global Navigation Satellite System) systems. Monitoring our planet's magnetic field and its ionospheric environment is therefore essential for studying these phenomena. This monitoring also enables us to understand the sources and long-term evolution of Earth's magnetic field, to aid navigation, to probe the properties of the Earth's interior and ocean dynamics, and to supply important information for geophysical surveys.

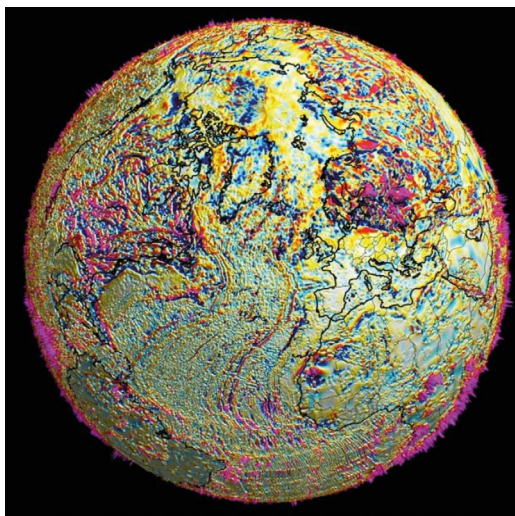
A project conceived in 2015 and brought to fruition thanks to CNES and ESA

Following its involvement in ESA's Earth Explorer Swarm mission launched in November 2013, the IPGP is at the heart of the NanoMagSat project. Conceived in 2015 with CEA-Léti to complement the Swarm mission in the context of a CNES call for ideas for the



Intensité du champ magnétique principal à la surface de la Terre au 01 Janvier 2024 (gauche), et composante radiale de ce même champ à la surface du noyau au sein duquel le champ est produit (droite). Ces deux cartes ont été reconstruites en utilisant les données Swarm des instruments ASM en mode vectoriel (Hulot *et al.*, 2025). Notez la faible intensité centrée sur l'Atlantique Sud (anomalie de l'Atlantique Sud, en bleue dans la carte de gauche), dont l'origine est liée à l'existence de régions où les lignes de champ entrent dans le noyau (en bleues dans la carte de droite) au lieu d'en sortir. Suivre, comprendre et prédire l'évolution de cette anomalie, responsable de risques majeurs d'irradiation en orbites basses, est l'un des principaux objectifs de la mission NanoMagSat.

Intensity of the main magnetic field at the Earth's surface on 01 January 2024 (left), and radial component of the same field at the surface of the core within which the field is being produced (right). These two maps were reconstructed using Swarm data from the ASM instruments in vector mode (Hulot *et al.*, 2025). Note the weak intensity centred on the South Atlantic (South Atlantic Anomaly, in blue in the left map), the origin of which is linked to the existence of regions where the field lines enter the core (in blue in the right map) instead of leaving it. One of the main objectives of the NanoMagSat mission is to monitor, understand and predict the evolution of this anomaly, which is responsible for major irradiation risks in low-Earth orbits.



Carte de la composante radiale du champ magnétique produit à la surface de la Terre par l'aimantation des roches de la lithosphère. Ce type de carte obtenue en combinant les observations de la mission Swarm, de la précédente mission CHAMP et de levés marins et aéromagnétiques donne des informations précieuses non seulement sur l'aimantation des roches, mais aussi sur leur histoire géologique et tectonique. NanoMagSat contribuera aussi à encore améliorer cette carte (© E. Thébault, d'après Thébault *et al.*, 2021).

Map of the radial component of the magnetic field produced at the Earth's surface by the magnetisation of rocks in the lithosphere. This type of map, obtained by combining observations from the Swarm mission, the previous CHAMP mission and marine and aeromagnetic surveys, provides valuable information not only on the magnetisation of rocks, but also on their geological and tectonic history. NanoMagSat will also help further improving this map (© E. Thébault, after Thébault *et al.*, 2021)

dans le cadre d'un appel à idée du CNES pour le développement de missions scientifiques exploitant des nanosatellites, ce projet a d'abord bénéficié du soutien du CNES pour notamment miniaturiser les magnétomètres du CEA-Léti embarqués sur Swarm. En 2019, le projet a pris une nouvelle dimension grâce au premier appel d'offre Scout Earth Explorer de l'ESA, auquel l'IPGP a répondu avec le CEA-Léti dans le cadre d'un consortium associant aussi la société Open Cosmos, lead industriel du consortium. Sélectionné pour une phase de consolidation menée en 2020, le projet a ensuite bénéficié en 2022 et 2023 d'une seconde phase destinée à faire progresser la maturité des technologies les plus critiques. C'est à la suite de cette phase que le consortium NanoMagSat a finalement reçu l'autorisation de débiter la mise en œuvre du projet, dont le contrat a donc formellement été signé le 27 Novembre 2024 entre l'ESA et la société Open Cosmos.

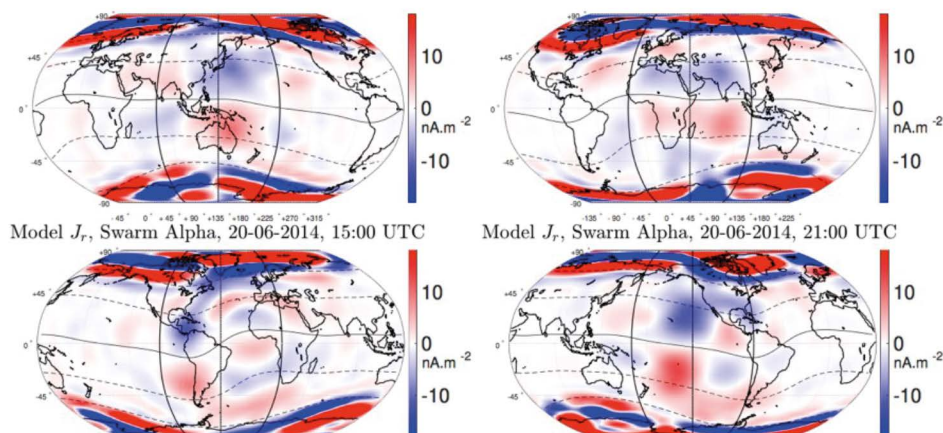
Une constellation innovante de trois nanosatellites embarquant des instruments miniaturisés

La mission NanoMagSat consiste en une constellation de « Cubesats » de type 16U (environ 20 x 20 x 40 cm³), conçue pour permettre une couverture géographique globale tout en réduisant à moins d'un mois le temps nécessaire pour observer toutes les heures locales aux latitudes comprises entre 60°N et 60°S. Un satellite sera placé en orbite quasi-polaire, les deux autres sur des orbites différentes inclinées à 60°. La charge utile embarquée est également inédite.

development of scientific missions using nanosatellites, this project first benefited from CNES support to initiate the miniaturization of the CEA-Léti magnetometers on board Swarm. In 2019, the project took on a new dimension thanks to ESA's first Scout Earth Explorer call for tenders, to which IPGP responded with CEA-Léti as part of a consortium also including the Open Cosmos company, acting as industrial lead. Selected for a consolidation phase in 2020, the project next benefited from a second phase in 2022 and 2023 to advance the maturity of the most critical technologies. Following this phase the NanoMagSat consortium finally received the authorisation to proceed with the implementation of the project, formally initiated with the signature of the contract on 27 November 2024 between ESA and Open Cosmos.

An innovative constellation of three nanosatellites carrying miniaturised instruments

The NanoMagSat mission consists of a constellation of 16U "Cubesats" (approximately 20 x 20 x 40 cm³), designed to provide global geographical coverage while reducing to less than a month the time needed to observe all local times at latitudes between 60°N and 60°S. One satellite will be placed on a near-polar orbit, the other two on separate orbits inclined at 60°. The on-board payload is also unprecedented. A miniaturised absolute magnetometer (MAM) will provide self-calibrating absolute vector measurements. To minimise any interference from the satellite, this MAM will be placed at the end of a deployable boom,



Cartes de l'évolution au cours d'une journée de la composante radiale des courants parcourant l'ionosphère à l'altitude des satellites Swarm. En rouge les courants orientés vers l'espace, en bleu, ceux orientés vers la Terre. Ces cartes révèlent l'existence de courants interhémisphériques aux latitudes moyennes qui connectent les hémisphères de part et d'autre de l'équateur magnétique (ligne noire continue) face au Soleil, et d'autres courants à hautes latitudes qui connectent l'ionosphère à la magnétosphère. NanoMagSat permettra de compléter notre connaissance de ces courants très dynamiques qui révèlent la façon dont l'atmosphère, l'ionosphère et la magnétosphère sont couplées dynamiquement et réagissent à l'activité solaire (Fillion *et al.*, 2024).

Maps showing changes in the radial component of currents flowing through the ionosphere at the altitude of the Swarm satellites over the course of a day. Shown in red are the currents directed towards space, in blue those directed towards the Earth. These maps reveal the existence of interhemispheric currents at mid-latitudes that connect the hemispheres on either side of the magnetic equator (solid black line) facing the Sun, and other currents at high latitudes that connect the ionosphere to the magnetosphere. NanoMagSat will help improve our knowledge of these highly dynamic currents, which reveal how the atmosphere, ionosphere and magnetosphere are dynamically coupled and react to solar activity (Fillion *et al.*, 2024).

Un magnétomètre absolu miniaturisé (MAM) permettra une mesure vectorielle absolue auto-calibrée. Afin de minimiser toute interférence liée au satellite, ce MAM sera placé à l'extrémité d'un bras déployable, sur un banc optique ultra-stable dont l'attitude sera restituée par deux caméras stellaires amagnétiques (STR). L'ensemble fournira des données magnétiques vectorielles à 1 Hz de très haute précision, qui permettront le suivi des composantes planétaires du champ magnétique terrestre. Des mesures scalaires à haute fréquence (2 kHz) du champ magnétique seront également fournies par chaque MAM, et complétées par des mesures vectorielles fournies par des magnétomètres haute fréquence (HFM) placés à mi-bras. Ces données permettront de caractériser les courants électriques rencontrés par les satellites et les ondes de très basses fréquences (ELF) parcourant l'ionosphère. La charge utile sera complétée par une sonde de Langmuir multi-électrodes (m-NLP), fournissant des mesures de densité (à 2 kHz) et température (à 1 Hz) électroniques et deux récepteurs GNSS bi-fréquences, pour le positionnement précis des satellites, la reconstruction du contenu électronique total (TEC) et l'obtention de données de radio-occultation ionosphérique. Ces données, utilisées conjointement avec les données magnétiques, permettront d'étudier la dynamique de l'ionosphère.

on an ultra-stable optical bench whose attitude in space will be determined by two non-magnetic stellar cameras (STR). The whole system will provide very high-precision vector magnetic data at 1 Hz, enabling the planetary components of the Earth's magnetic field to be monitored. High-frequency (2 kHz) scalar measurements of the magnetic field will also be provided by each MAM, supplemented by vector measurements provided by high-frequency magnetometers (HFM) placed at mid-boom. These data will be used to characterise the electrical currents encountered by the satellites and the low frequency (LF) waves travelling through the ionosphere. The payload will be complemented by a multi-electrode Langmuir probe (m-NLP), providing measurements of electron density (at 2 kHz) and temperature (1 Hz), and two dual-frequency GNSS receivers, for precise satellite positioning, total electron content (TEC) reconstruction and ionospheric radio occultation data. These data are to be used in conjunction with the magnetic data to study the dynamics of the ionosphere.

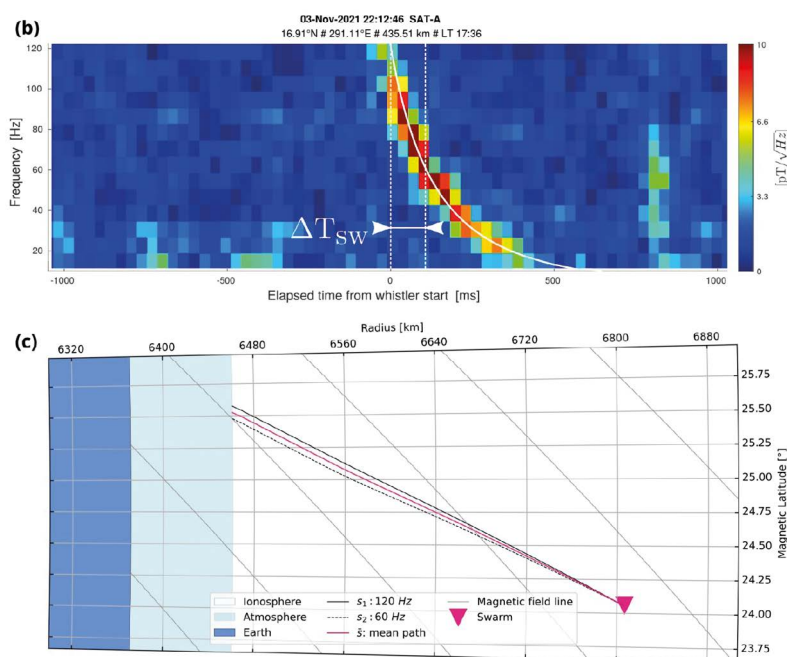


Une mission sous la responsabilité scientifique de l'IPGP, également chargé du traitement et de la distribution des données pour le compte de l'ESA

Le consortium international chargé de la réalisation de la mission et de son exploitation est mené par la société britannique Open Cosmos, responsable de la plateforme, du lancement et de l'opération des satellites. Open Cosmos est également en charge des instruments GNSS (récepteurs Novatel, antennes Tallysman). La société espagnole COMET Aerospace réalise le bras déployable et le banc optique. Le CEA-Léti est responsable de l'ensemble de la charge utile et développe les instruments MAM et HFM. L'Université Technique du Danemark (DTU) fournit les caméras stellaires STR, tandis que l'Université d'Oslo en Norvège est en charge des sondes de Langmuir m-NLP.

A mission under the scientific responsibility of IPGP, also in charge of processing and distributing the data on behalf of ESA.

The international consortium responsible for implementing and operating the mission is led by the British company Open Cosmos, which provides the platform and will supervise the launch and operation of the satellites. Open Cosmos is also in charge of the GNSS instruments (Novatel receivers, Tallysman antennas). The Spanish company COMET Aerospace provides the deployable boom and the optical bench. CEA-Léti is responsible for the entire payload and is designing the MAM and HFM instruments. The Technical University of Denmark (DTU) is supplying the STR star cameras, while the University of Oslo in Norway is in charge of the m-NLP Langmuir probes.



Exemple d'onde de type siffleur détectée dans les fréquences ELF par les instruments ASM de Swarm en mode burst. L'analyse spectrale de ce signal (en haut) révèle une dispersion du signal (les fréquences élevées arrivant en premier), qui témoigne des propriétés du plasma le long du trajet ionosphérique (en bas) d'un signal impulsif produit par un éclair atmosphérique (d'après Jenner *et al.* 2024). Grâce aux données magnétiques à haute fréquence, NanoMagSat aura la capacité de sonder l'ionosphère de cette manière sous les satellites, tandis que le TEC au-dessus des satellites, les données de radio-occultation, ainsi que les densité et température électroniques locales seront fournis par les récepteurs GNSS et les sondes de Langmuir.

Example of a whistler-type wave detected at ELF frequencies by Swarm's ASM instruments in burst mode. Spectral analysis of this signal (top) reveals a dispersion of the signal (with high frequencies arriving first), reflecting the properties of the plasma along the ionospheric path (bottom) of an impulsive signal produced by an atmospheric lightning flash (after Jenner *et al.* 2024). Using high-frequency magnetic data, NanoMagSat will be able to probe the ionosphere below the satellites in this way, while TEC above the satellites, radio occultation data, and local electron density and temperature data, will be provided by GNSS receivers and Langmuir probes.



L'IPGP, quant à lui, joue un double rôle. Responsable scientifique de la mission, il pilote le Science Advisory Group international qui garantit la conformité des choix techniques du consortium avec les exigences de la mission. Par ailleurs chargé de la production des données scientifiques, l'IPGP accueillera le centre de données qui opérera l'ensemble des chaînes de traitement et distribuera les données, avec le concours de l'Université Technique de Delft (TU Delft) aux Pays-Bas pour ce qui concerne les données de positionnement.

Les premières données prévues pour fin 2027 pour une opération jusqu'en 2031

Conformément à ses engagements contractuels vis-à-vis de l'ESA, le projet dispose désormais de trois ans pour lancer le premier des trois satellites sur son orbite polaire. Ce lancement est actuellement prévu pour Novembre 2027. Les deux autres satellites compléteront la constellation au printemps 2028. Après une phase initiale de commissioning, la constellation entrera en phase d'exploitation à l'automne 2028 pour une durée minimale de trois ans.

The IPGP plays a dual role. As the scientific lead of the mission, it steers the international Science Advisory Group which ensures that the consortium's technical choices meet the mission's requirements. Also responsible for producing the science data, the IPGP will host the data centre that will operate all the processing chains and distribute the data, with support from the Technical University of Delft (TU Delft) in the Netherlands for the production of the positioning data.

First data scheduled for the end of 2027 with an operation planned until 2031

Following its contractual commitments to ESA, the project now has three years to launch the first of the three satellites into its polar orbit. This launch is currently scheduled for November 2027. The other two satellites will complete the constellation in spring 2028. After an initial commissioning phase, the constellation will next enter its operational phase in autumn 2028 for a minimum of three years.



L'équipe NanoMagSat à l'IPGP. De gauche à droite : Maximilien Salinas, Pierdavid Coisson, Louis Chauvet, Gauthier Hulot, Olivier Bonnot, Robin Deborde.

The NanoMagSat team at IPGP. From left to right : Maximilien Salinas, Pierdavid Coisson, Louis Chauvet, Gauthier Hulot, Olivier Bonnot, Robin Deborde.

La constellation NanoMagSat donnera ainsi l'opportunité aux chercheurs de mieux comprendre la dynamique du noyau terrestre responsable de l'évolution du champ magnétique principal. Elle permettra également de mieux caractériser les différents types de courants électriques qui entourent et parcourent notre planète : ceux ionosphériques et magnétosphériques qui témoignent de la réponse de la Terre au vent solaire, ceux produits par la circulation et les marées océaniques, ainsi que ceux qui circulent dans la Terre solide et permettent d'en sonder les propriétés électriques. En outre, la constellation permettra d'améliorer encore la cartographie globale de la distribution des roches aimantées présentes dans la lithosphère. Enfin, les mesures in-situ permettront d'étudier la dynamique du plasma ionosphérique, à petites et grandes échelles.

Vers l'observation permanente du champ magnétique terrestre depuis l'espace

NanoMagSat est conçue comme une première étape vers l'extension dans l'espace du réseau INTERMAGNET d'observatoires magnétiques auquel l'IPGP contribue également afin de permettre le suivi permanent du champ magnétique de la Terre et de son environnement ionosphérique.

The NanoMagSat constellation will thus provide researchers with the possibility of better understanding the dynamics of the Earth's core that drives the evolution of the main magnetic field. It will further help better characterize the different electric currents that surround and run through our planet : the ionospheric and magnetospheric currents that reflect the Earth's response to the solar wind, those produced by ocean circulation and tides, and those that run through the solid Earth and allow sounding its electrical properties. In addition, the constellation will help further improve global mapping of the distribution of magnetised rocks in the lithosphere. Finally, in-situ measurements will enable the study of the dynamics of the ionospheric plasma at both small and large scales.

Towards permanent observation of the Earth's magnetic field from space

NanoMagSat is designed as a first step towards the extension into space of the INTERMAGNET network of magnetic observatories, to which the IPGP is also contributing, to enable permanent monitoring of the Earth's magnetic field and its ionospheric environment.

En savoir plus / Read more :

Deconinck, F., Hulot, G., Léger, J.M., Clausen, L.B.N., Pastena, M., Lejault, J.P., Wilkinson, J., Mataix Caballero, D., Vallmitjana Tostado, M., Coisson, P., Jager, T., Nieto, P., Jørgensen, J.L., **NanoMagSat Status : a 3X16U**

Low-Earth Orbiting constellation to monitor the Earth magnetic field and the ionospheric environment, *Proceedings Volume of Small Satellites Systems and Services Symposium (4S 2024)*, 135462K, doi : 10.1117/12.3062471, 2025.

Fillion, M., Hulot, G., Alken, P., Chulliat, A., **Modelling the climatology of low- and mid-latitude F-region ionospheric currents using the Swarm constellation**, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 128, e2023JA031344, doi : 10.1029/2023JA031344, 2023.

Hulot, G., Chauvet, L., Deborde, R., Léger, J.M., Jager, T., Fillion, M., Coisson, P., **A DGRF 2020 candidate model based on Swarm ASM experimental vector mode data improved through a dedicated post-calibration strategy**, *Earth Planets and Space*, in preparation, 2025.

Jenner, M., Coisson, P., Hulot, G., Buresova, D., Truhlik, V., Chauvet, L., **Total Root Electron Content : A New Metric for the Ionosphere Below Low Earth Orbiting Satellites**, *Geophys. Res. Lett.*, 51, e2024GL110559, doi : 10.1029/2024GL110559, 2024.

Thébault, E., Hulot, G., Langlais, B., Vigneron, P., **A Spherical Harmonic model of Earth's lithospheric magnetic field up to degree 1050**, *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL095147, doi : 10.1029/2021GL095147, 2021.

Contact : Gauthier Hulot | gh@ipgp.fr





Enseignement Education

L'année 2024 a constitué une étape charnière pour l'IPGP, marquée par la diplomation des premières promotions de parcours innovants et par une refonte ambitieuse de son offre de formation de master. Ces évolutions témoignent d'un engagement fort de l'Institut à proposer des formations d'excellence en phase avec les grands défis scientifiques, environnementaux et sociétaux contemporains.

Du côté de la licence, les parcours « Politiques de la Terre » (PoTerre) en partenariat avec Sciences Po, et « Environnement et Énergies nouvelles » (CPES-2E) avec le lycée Janson de Sailly et l'Université Paris Cité, ont confirmé leur attractivité par l'excellence du placement de leurs diplômés. Ces formations hybrides, alliant sciences dures et sciences humaines ou ingénierie, illustrent la capacité de l'IPGP à innover pour mieux préparer les étudiants aux enjeux de la transition écologique et énergétique.

En parallèle, une nouvelle offre de formation en master a été élaborée pour la période 2025-2029, avec pour objectif de renforcer l'articulation entre licence et master, de mieux valoriser les axes de recherche de l'Institut et de stabiliser les parcours. Deux nouveaux masters — « Géosciences pour l'Anthropocène » et « Origine : des planètes au vivant » — incarnent cette ambition en proposant des formations originales, transdisciplinaires, étroitement arrimées aux grands thèmes scientifiques portés par l'IPGP.

À travers ces dynamiques, l'IPGP affirme plus que jamais sa vocation : former des scientifiques capables de penser et d'agir à l'échelle des bouleversements planétaires, dans une approche rigoureuse, critique et résolument tournée vers l'avenir.

The year 2024 marked an important moment for the IPGP, with the graduation of the first cohorts from its innovative academic programs and the launch of an ambitious overhaul of its master's degree offerings. These developments reflect the Institute's strong commitment to delivering high-quality education aligned with today's major scientific, environmental, and societal challenges.

At the undergraduate level, the "Earth Policies" (PoTerre) program, developed in partnership with Sciences Po, and the "Environment and New Energies" track (CPES-2E), in collaboration with Lycée Janson de Sailly and Université Paris Cité, have confirmed their attractiveness through the outstanding academic trajectories of their graduates. These hybrid programs, combining earth sciences with the humanities or engineering, highlight IPGP's ability to innovate and prepare students for the ecological and energy transitions ahead.

Simultaneously, a new master's curriculum for 2025-2029 has been designed, aiming to reinforce the continuity between undergraduate and graduate studies, better align training with IPGP's research priorities, and provide more stable academic paths. Two new programs — "Geosciences for the Anthropocene" and "Origins: From Planets to Life" — embody this vision by offering unique, transdisciplinary training closely connected to the Institute's major scientific themes.

Through these dynamic initiatives, IPGP reaffirms its core mission: to train scientists capable of thinking and acting at the scale of planetary transformations, with a rigorous, critical, and forward-looking approach.



Nouvelle Offre de Formation de Master 2025-2029

New Master's Program Offering 2025-2029

Dans le cadre de notre dépôt de dossier d'accréditation 2024 auprès de l'HCERES, nous avons saisi l'opportunité de repenser en profondeur notre master Sciences de la Terre et des Planètes, Environnement (STPE). Cette révision vise à stabiliser nos parcours tout en renforçant l'attractivité de notre formation.

Notre objectif est d'attirer une proportion plus importante de nos étudiants de licence en assurant une meilleure continuité et une plus grande cohérence entre les cycles de licence et de master. Ces dernières années, notre licence s'est orientée vers des parcours pluridisciplinaires axés sur les enjeux sociétaux liés aux ressources et à l'énergie. Pour accompagner ces évolutions, nous avons décidé de restructurer notre master en supprimant trois parcours existants et en créant deux nouveaux parcours étroitement liés aux axes de recherche de l'IPGP.

Le premier nouveau parcours, intitulé « Géosciences pour l'Anthropocène », formera les étudiants aux outils de la géophysique et de la géochimie appliqués à l'analyse, à la surveillance et à la gestion de l'environnement et de la zone critique. Ce parcours répond aux défis contemporains en matière de changements environnementaux et de gestion durable des ressources.

Le second nouveau parcours, « Origine : des Planètes au Vivant », proposera une formation pluridisciplinaire en géophysique, géochimie et biologie. Les étudiants seront préparés à l'étude de la formation et de la différenciation des planètes, de l'origine de la vie, de ses premières étapes d'évolution, ainsi qu'à l'analyse de l'évolution des réservoirs planétaires au fil du temps. Ce parcours offre une perspective unique sur les questions fondamentales de notre existence et de notre environnement.

Ces deux nouveaux parcours s'appuieront sur les thèmes majeurs développés à l'Institut de physique du globe. En plus de renforcer l'ancrage avec nos activités de recherche, ils offriront une formation originale, unique à l'échelle régionale et nationale.

Par ailleurs, les trois parcours actuels – Géophysique, Risques Naturels et Fundamentals of Remote Sensing – seront réunis en M1 au sein d'un parcours unique intitulé « Géophysique, Risques Naturels et Télédétection ». Ce parcours sera basé sur un tronc commun avec des spécialisations proposées au second semestre. Les parcours resteront différenciés en M2. Cette restructuration permettra

As part of our 2024 accreditation application with the HCERES, we have taken the opportunity to thoroughly rethink our Master's program in Earth, Planetary, and Environmental Sciences (STPE). This revision aims to stabilize our programs while enhancing the attractiveness of our education.

Our goal is to attract a larger proportion of our undergraduate students by ensuring better continuity and greater coherence between the undergraduate and graduate cycles. In recent years, our undergraduate program has shifted towards multidisciplinary paths focused on societal issues related to resources and energy. To support these developments, we have decided to restructure our Master's program by eliminating three existing paths and creating two new ones closely aligned with IPGP's research axes.

The first new path, titled "Geosciences for the Anthropocene," will train students in the tools of geophysics and geochemistry applied to the analysis, monitoring, and management of the environment and the critical zone. This path addresses contemporary challenges in environmental change and sustainable resource management.

The second new path, "Origin: From Planets to Life," will offer a multidisciplinary education in geophysics, geochemistry, and biology. Students will be prepared to study the formation and differentiation of planets, the origin of life, its early evolutionary stages, and the analysis of planetary reservoirs over time. This path provides a unique perspective on the fundamental questions of our existence and environment.

These two new paths will build on the major themes developed at the Institut de physique du globe. In addition to strengthening the connection with our research activities, they will offer original and unique training at both the regional and national levels.

Furthermore, the three current paths—Geophysics, Natural Hazards, and Fundamentals of Remote Sensing—will be combined in the first year (M1) into a single path titled "Geophysics, Natural Hazards, and Remote Sensing." This path will be based on a common core with specializations offered in the second semester. The paths will remain



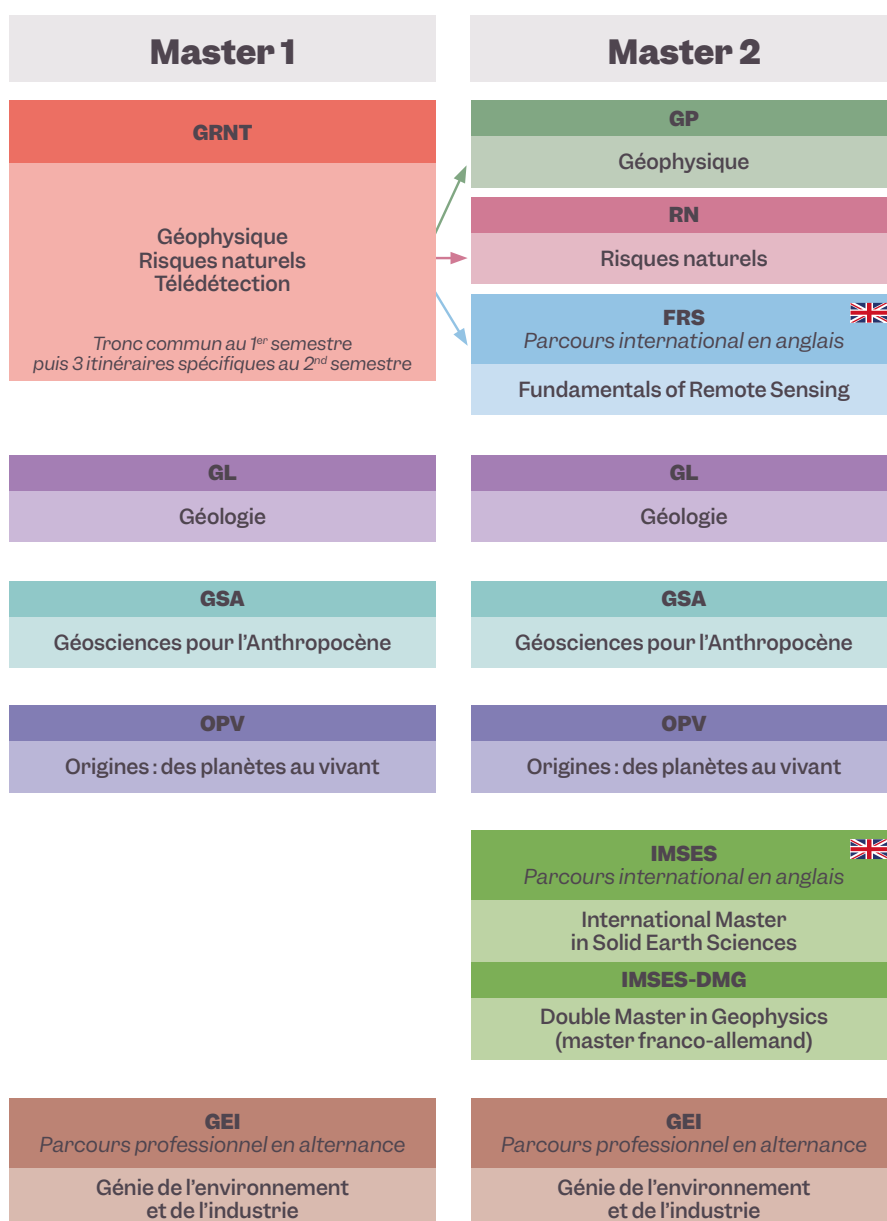
de mutualiser les enseignements, de renforcer la cohérence pédagogique, d'atteindre un effectif cible favorisant la dynamique de promotion, et de laisser aux étudiants le temps de préciser leur orientation.

Cette nouvelle offre de formation reflète notre engagement à former des générations responsables, capables de répondre aux grands défis environnementaux et sociétaux de demain. Nous sommes convaincus que ces évolutions renforceront l'attractivité et la pertinence de nos programmes, tout en offrant à nos étudiants une formation de qualité, en phase avec les enjeux actuels et futurs.

differentiated in the second year (M2). This restructuring will allow for shared teaching, strengthen pedagogical coherence, achieve a target enrollment that fosters class dynamics, and give students time to refine their career focus.

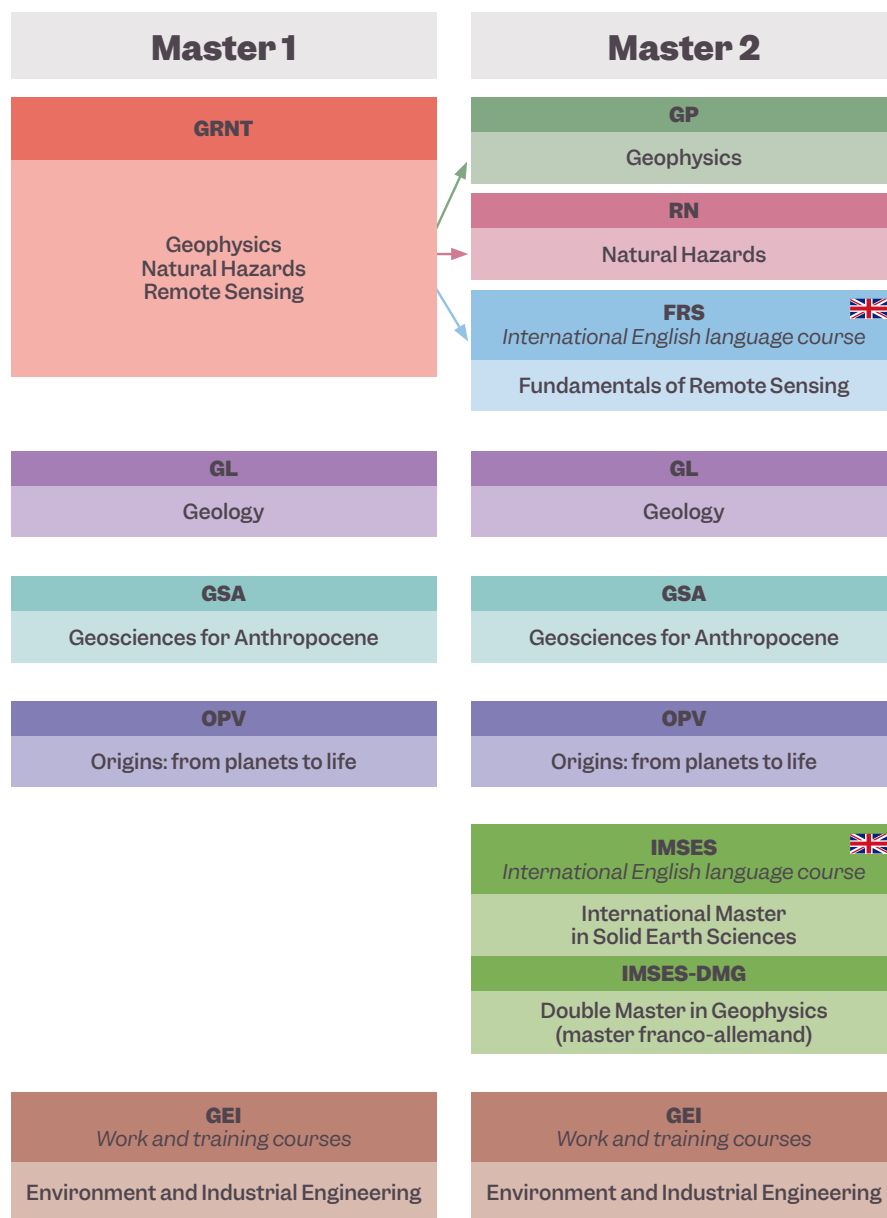
This new program offering reflects our commitment to training responsible generations capable of addressing tomorrow's major environmental and societal challenges. We are confident that these changes will enhance the attractiveness and relevance of our programs while providing our students with high-quality education aligned with current and future issues.

Les parcours du master STPE





STPE Master Programs





Remise des diplômes des premières promotions des parcours innovants de l'IPGP : bilan et perspectives

Graduation of the first cohorts from IPGP's innovative programs : achievements and future prospects

L'année 2024 a marqué une étape importante pour l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP), avec la diplomation des toutes premières promotions issues de nos parcours innovants, conçus en collaboration étroite avec des établissements académiques parisiens reconnus. Intégrés à la licence Sciences de la Terre, ces parcours d'excellence répondent aux enjeux sociétaux et environnementaux majeurs de notre époque.

Le parcours « Politiques de la Terre » (PoTerre), proposé conjointement avec Sciences Po depuis 2020, a vu ses 16 premiers étudiants diplômés en juin 2024. Cette formation unique, combinant géosciences et sciences humaines, prépare les futurs acteurs à relever les défis planétaires contemporains tels que le changement climatique, la transition énergétique et la gestion durable des ressources. Après quatre années de formation dont une passée à l'international, les étudiants sont désormais titulaires d'une licence en Sciences de la Terre délivrée par l'IPGP et d'un Bachelor of Arts and Sciences de Sciences Po. Tous les diplômés de cette première promotion poursuivent actuellement leurs études dans des parcours variés, confirmant ainsi l'attractivité et la pertinence de ce cursus novateur.

Le parcours Cycle Pluridisciplinaire d'Études Supérieures (CPES) « Environnement et Énergies nouvelles » (2E), lancé en 2021 en partenariat avec le lycée Janson de Sailly et l'Université Paris Cité, a vu également diplômé sa première promotion composée de 10 étudiants. La totalité de ces étudiants a choisi de poursuivre des études supérieures : 30 % en masters spécialisés et 70 % dans des écoles d'ingénieurs prestigieuses. Parmi les masters choisis figurent le Master Sciences de la Terre, Planète Environnement de l'Université Paris Saclay et le Master Gestion de l'Environnement de Nantes. Les écoles intégrées par les diplômés témoignent de l'excellence de cette formation : École Polytechnique, Écoles Normales Supérieures, Écoles Centrales et IMT Atlantique. Ces résultats remarquables confirment l'attractivité du CPES et son rôle stratégique dans la formation des futurs acteurs du développement durable et de la transition énergétique.

The year 2024 marked a significant milestone for the Institut de physique du globe de Paris (IPGP) with the graduation of the very first cohorts from our innovative programs, designed in close collaboration with renowned academic institutions in Paris. Integrated into the bachelor's degree in Earth Sciences, these programs of excellence address the major societal and environmental challenges of our time.

The "Earth Policies" (PoTerre) program, offered jointly with Sciences Po since 2020, saw its first 16 students graduate in June 2024. This unique training, combining geosciences and humanities, prepares future leaders to tackle contemporary global challenges such as climate change, energy transition, and sustainable resource management. After four years of study, including one year abroad, the students now hold a bachelor's degree in Earth Sciences from IPGP and a bachelor of arts and sciences from Sciences Po. All graduates from this first cohort are currently pursuing further studies in various fields, confirming the attractiveness and relevance of this innovative program.

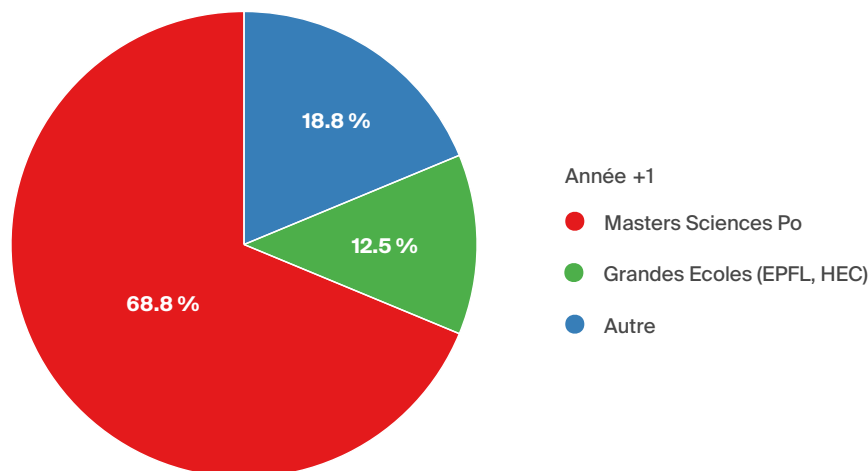
The pluridisciplinary cycle of higher education (CPES) "Environment and New Energies" (2E), launched in 2021 in partnership with Lycée Janson de Sailly and Université Paris Cité, also saw its first cohort of 10 students graduate. All of these students have chosen to pursue higher education: 30% in specialized master's programs and 70% in prestigious engineering schools. Among the chosen master's programs are the master's in Earth Sciences, planet environment at Université Paris Saclay, and the master's in environmental management in Nantes. The engineering schools joined by the graduates attest to the excellence of this program: École Polytechnique, Écoles Normales Supérieures, Écoles Centrales, and IMT Atlantique. These remarkable results confirm the attractiveness of the CPES and its strategic role in training future leaders in sustainable development and energy transition.



L'IPGP continue d'assurer un suivi attentif de ses diplômés afin de valoriser leur parcours et d'accompagner leur insertion dans le monde professionnel ou académique. Cette réussite collective illustre parfaitement notre engagement à former des générations responsables, capables de répondre aux grands défis environnementaux et sociétaux de demain.

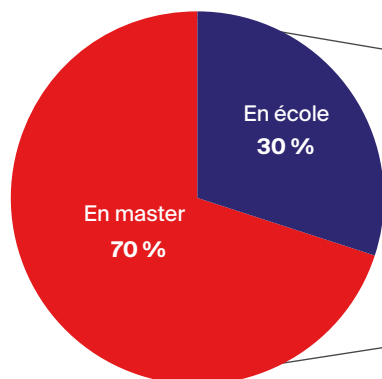
IPGP continues to closely monitor its graduates to enhance their career paths and support their integration into the professional or academic world. This collective success perfectly illustrates our commitment to training responsible generations capable of addressing the major environmental and societal challenges of tomorrow.

Devenir des étudiants de la licence Sciences de la Terre, parcours Politique de la Terre, promotion 2020.
Career paths of the 2020 cohort of the Earth Sciences Bachelor's degree, Earth Policy track.

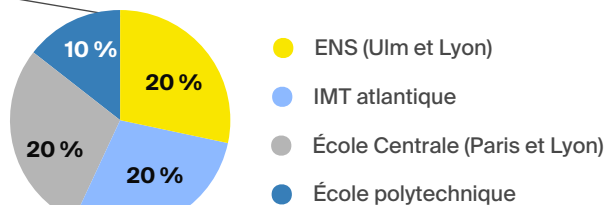


Devenir des étudiants de la promotion 2021 du CPES (Université Paris Cité - Janson de Sailly)
Career paths of the 2021 cohort of the CPES program (Université Paris Cité – Janson de Sailly).

Répartition des élèves admis en école
en master et autres
*Breakdown of students admitted to graduate
schools, master's programs, and others.*



Répartition des élèves
admis en école*
*Breakdown of students
admitted to graduate schools**



*Cela ne prend pas en compte les élèves admis dans plusieurs écoles
This does not take into account students admitted to multiple schools.

Nouvelles thèses

New PhDs



28 nouvelles thèses
commencées en 2024

28 new PhDs started in 2024



15 femmes

15 women

13 hommes

13 men



9 doctorants issus du
master IPGP

9 students from the IPGP Master's program

19 doctorants hors
master IPGP

19 students from outside the IPGP Master's

Thèses soutenues

Defended PhDs



35 thèses
soutenues en 2024

35 PhDs defended in 2024



13 femmes

13 women

22 hommes

22 men



14 doctorants
étrangers

10 international PhD students

14 doctorants
français

12 French PhD students



Linru Fang

Origine et évolution des premiers astéroïdes

Origin and evolution of the first asteroids

L'échelle temporelle de l'accrétion et de la différenciation des astéroïdes et des corps planétaires fournit des informations fondamentales sur la formation et la différenciation des planètes telluriques. Les chronomètres à courte durée de vie constituent des outils précieux pour estimer les âges de la différenciation croûte-manteau, de la formation du noyau, de la solidification du magma, ainsi que de l'évolution thermique des planétésimaux formés précocement. Toutefois, des incertitudes subsistent concernant les périodes de demi-vie et l'abondance initiale des nucléides parents de certains chronomètres à courte durée de vie (tels que ^{146}Sm - ^{142}Nd et ^{60}Fe - ^{60}Ni), ce qui limite leur utilisation. L'abondance et la composition isotopique des éléments volatils et réfractaires sont essentielles pour comprendre l'évolution des éléments volatils et la nature des précurseurs des planètes telluriques dans le système solaire. Cependant, le manque de données isotopiques de haute précision a limité notre compréhension des processus gouvernant les variations des éléments volatils et réfractaires au sein des corps planétaires.

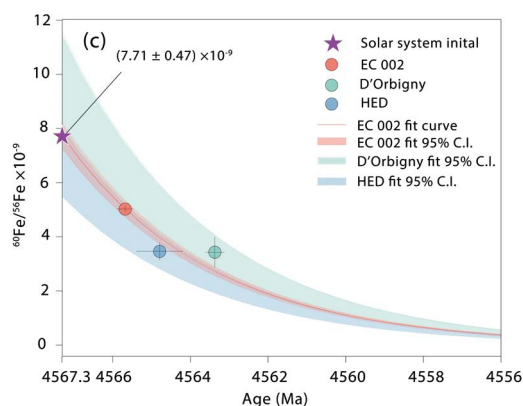
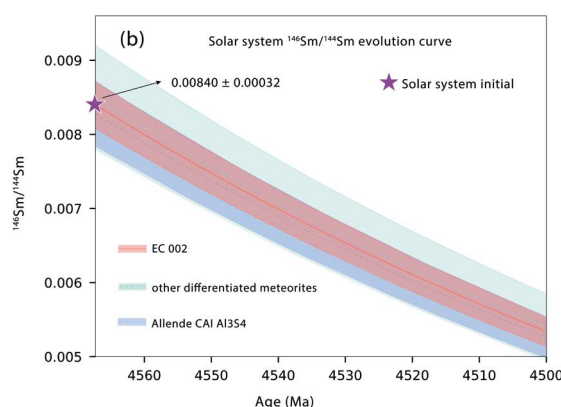
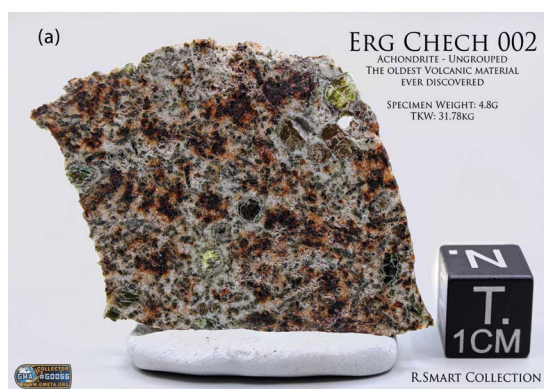
Ainsi, cette thèse de doctorat vise à mieux contraindre à la fois la temporalité des processus de différenciation et l'origine des abondances en éléments volatils dans les premiers planétésimaux formés, grâce à des analyses isotopiques de haute précision et sensibilité des métaux. En utilisant

The accretion and differentiation timescale of asteroids and planetary bodies provide primary information on how terrestrial planets formed and differentiated. Short-lived chronometers are great tools for constraining the ages of crust-mantle differentiation, core formation, magma solidification, and the thermal evolution of early-formed planetesimals. However, uncertainties exist in the half-lives and the initial abundance of the parent nuclides of some short-lived chronometers (such as ^{146}Sm - ^{142}Nd and ^{60}Fe - ^{60}Ni), which limits their application. The abundance and isotopic composition of volatile and refractory elements are essential for understanding the evolution of volatile elements and the nature of precursors to terrestrial planets in the solar system. However, the lack of high-precision isotope data limited our understanding of the processes governing the variations of volatile and refractory elements in planetary bodies.

Thus, this PhD aims to better constrain both the temporality of differentiation processes and the origin of volatile element abundances in the first formed planetesimals, using the high-precision, high-sensitivity metal isotope analyses techniques. with the oldest

l'achondrite andésitique la plus ancienne connue, Erg Chech 002 (EC 002), ce travail a permis de valider la demi-vie du ^{146}Sm , de définir l'abondance initiale la plus précise et exacte des nucléides à courte durée de vie ^{146}Sm et ^{60}Fe , et d'en déduire l'histoire de l'évolution thermique du corps parent de EC 002. Par ailleurs, l'utilisation des isotopes stables du Ba, Zn et Mg dans les chondrites et les achondrites a permis de déterminer la composition isotopique du Ba du manteau, l'origine et le parcours évolutif des éléments volatils de l'astéroïde 4-Vesta, ainsi que le comportement des éléments majeurs au cours de l'océan magmatique du corps parent des angrites, les roches magmatiques les plus dévolatilisées du système solaire.

known andesitic achondrite Erg Chech 002 (EC 002), this work testified the half-life of ^{146}Sm , defined the most accurate and precise initial abundance of short-lived nuclides ^{146}Sm and ^{60}Fe , and deduced the thermal evolution history of EC 002 parent body. Meanwhile, using stable Ba, Zn and Mg isotopes of chondrites and achondrites, this study presents the best estimate of the Ba isotopic composition of bulk silicate earth, the origin and evolution pathway of volatiles of asteroid 4-Vesta, and the major elements behaviors during magma ocean of angrite parent body, the most volatile depleted materials in the Solar System.



Légende de la figure : (a) La plus ancienne météorite andésitique connue, Erg Chech 002 (EC 002) ; (b) EC 002 définit le rapport initial $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ du système solaire le plus précis et exact, déterminé à 0.00840 ± 0.00032 ; (c) EC 002 contraint également le rapport initial $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ du système solaire le plus précis et exact, évalué à $(7.71 \pm 0.47) \times 10^{-9}$.

Figure caption : (a) The oldest known andesitic meteorite, Erg Chech 002 (EC 002) ; (b) EC 002 defines the most precise and accurate solar system initial $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ ratio, determined to be 0.00840 ± 0.00032 ; (c) EC 002 also constrains the most precise and accurate Solar system initial $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ ratio to $(7.71 \pm 0.47) \times 10^{-9}$.

Doctorante
PhD candidate
Linru Fang
lfang@ipgp.fr

Directeurs de thèse
PhD supervisors
Frédéric Moynier | moynier@ipgp.fr
Marc Chaussidon | chaussidon@ipgp.fr



Augustin Maller

La différenciation de la Terre : étude des instabilités et de la fragmentation lors d'un impact

Earth's differentiation by large planetary collisions : instability and fragmentation in a liquid impact

La Terre s'est formée par une succession d'impacts entre des embryons planétaires. Après chaque collision, le noyau métallique de l'embryon impactant a coulé dans un océan de silicates fondus. Dans cet océan, le métal liquide s'est-il fragmenté en gouttes ? Cette fragmentation, et la taille des gouttes ainsi formées, ont déterminé l'efficacité des transferts chimiques entre le métal de l'impactant et les silicates de l'océan de magma et, par conséquent, la composition du noyau et du manteau de la Terre.

Pour répondre à cette question, nous avons réalisé des expériences de dynamique des fluides modélisant les impacts géants planétaires. Dans une première série d'expériences, nous avons étudié l'impact d'un volume centimétrique de liquide monophasique, représentant le noyau de l'impactant, à la surface d'un bain d'un liquide immiscible et moins dense, représentant l'océan de magma. Nos expériences reproduisent l'écoulement observé dans les simulations numériques de collisions planétaires : l'impact éjecte une corolle et ouvre un cratère hémisphérique, qui s'effondre et forme un jet ascendant. Contrairement aux simulations, nos expériences se rapprochent du

The Earth formed by large impacts between planetary embryos. After each collision, the metallic core of the impactor fell into a molten silicate magma ocean, where metal could have fragmented into drops. This fragmentation controlled the efficiency of chemical transfers between the impactor metal and the magma ocean, and, as a consequence, the composition of the Earth's core and mantle. However, it is unclear whether the projectile core fragmented during the impact at the Earth's surface, or deeper in the magma ocean, and whether the fragments were small enough to equilibrate chemically.

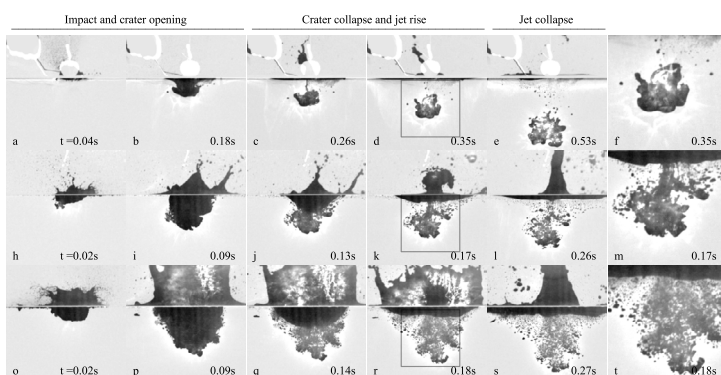
To answer these questions, we present laboratory experiments on the fluid dynamics of large planetary collisions. In a first series of experiments, we investigate the impact of a single-phase centimetric liquid volume, representing the impactor core, onto a pool of a lighter immiscible liquid, representing the magma ocean. Our experiments reproduce the cratering process observed in numerical simulations of planetary collisions : the impact ejects a crown of target material and opens a crater, which collapses into an upward jet. Unlike simulations, our experiments approach the dynamical

régime dynamique des collisions planétaires, durant lesquelles les forces inertielles dominent par rapport aux forces visqueuses et interfaciales. En variant la vitesse et la taille de l'impactant, nous avons déterminé les conditions pour lesquelles ce dernier se fragmente en gouttes. La fragmentation se produit lorsque le nombre de Froude, qui mesure l'importance relative de l'inertie par rapport à la gravité, est supérieur à 10, quelle que soit la valeur de la tension superficielle. Cette fragmentation résulte de la croissance d'une instabilité de Rayleigh-Taylor à l'interface entre le liquide impactant et le bain liquide. La taille moyenne des gouttes ainsi formées dépend du rapport entre l'inertie des instabilités de Rayleigh-Taylor et la force de tension superficielle. Dans une deuxième série d'expériences, nous avons utilisé des impacteurs biphasiques, pour montrer que nos résultats sont valables pour des embryons planétaires différenciés en un noyau et un manteau.

Appliqués aux collisions qui ont formé la Terre, nos résultats suggèrent que le noyau de la plupart des impacteurs s'est fragmenté en gouttes. Pour des objets percutant la Terre à la vitesse d'échappement, seuls les noyaux des corps de rayon supérieur à 2100 km ne se sont pas fragmentés et ont coalescé directement avec le noyau de la Terre. Tout impactant plus petit ou plus rapide a engendré la fragmentation au moins partielle du noyau. Les gouttes de métal qui en ont résulté avaient un rayon inférieur au millimètre, ce qui garantit qu'elles se sont équilibrées complètement avec les silicates environnants.

regime of planetary collisions, during which inertia is large compared to interfacial and viscous forces. Varying the velocity and size of the impactor, we determine the conditions under which the impactor fragments into drops. We find that fragmentation occurs when the Froude number, which measures the relative importance of inertia to gravity, is larger than 10, regardless of the strength of surface tension. This fragmentation results from the growth of a turbulent Rayleigh-Taylor instability at the interface between the impacting liquid and the target pool. We find that the average drop size is consistent with existing theories of fragmentation in a turbulent flow, assuming the turbulence originates from Rayleigh-Taylor instabilities. In a second series of experiments, we use two-phase impactors to show that these results hold for planetary embryos that are differentiated into a core and a mantle.

Applied to planet formation, our results suggest that fragmentation was a likely outcome of planetary collisions. Only the cores of bodies with a radius larger than 2100 km impacting onto the Earth at the escape velocity did not fragment and merged directly with the Earth's core. Any smaller or faster impactor produced some degree of fragmentation. The resulting metal drops were millimetric, ensuring that they fully equilibrated with the surrounding silicates.



Images en ombres portées illustrant les différents régimes observés lors de l'augmentation de la vitesse d'impact U (de haut en bas), pour un rayon d'impacteur fixe, $R = 2$ cm.

(a-f) Pas de fragmentation : $U = 0.6$ m/s.

Le volume impactant reste cohésif et intact à la fin de l'effondrement du cratère (d,f).

(h-n) Fragmentation partielle : $U = 2.0$ m/s.

Le liquide impactant est partiellement fragmenté à la fin de l'effondrement du cratère (k,m).

(o-t) Fragmentation totale : $U = 4.3$ m/s.

Le volume impactant est entièrement fragmenté en gouttelettes lorsque le cratère s'est résorbé (r,t).

Shadowgraph images illustrating the various regimes observed when increasing the impact velocity U (from top to bottom) for a fixed impactor radius, $R = 2$ cm.

(a-f) No fragmentation: $U = 0.6$ m/s.

The impacting volume is cohesive and unbroken at the end of the collapse of the crater (d,f).

(h-n) Partial fragmentation: $U = 2.0$ m/s.

The impacting liquid is partially fragmented at the end of crater collapse (k,m).

(o-t) Total fragmentation: $U = 4.3$ m/s.

The impacting volume is entirely fragmented into drops when the crater has receded (r,t).

Doctorant

PhD candidate

Augustin Maller

maller@ipgp.fr

Directeurs de thèse

PhD supervisors

Maylis Landeau | landeau@ipgp.fr

Sébastien Charnoz | charnoz@ipgp.fr





Partenariats et relations internationales

Partnerships and international
relationships

L'IPGP et l'INGV signent un protocole d'accord pour renforcer leur collaboration scientifique et technique

The IPGP and the INGV Sign Memorandum of Understanding to Foster Scientific and Technical Collaboration

L'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) et l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ont le plaisir d'annoncer la signature d'un protocole d'accord (MoU) le 12 septembre 2024. Ce partenariat de cinq ans favorisera les échanges scientifiques et techniques entre ces deux institutions de premier plan dans les sciences de la Terre.

Le protocole d'accord met en place un cadre de collaboration qui permettra aux deux institutions de coopérer dans des domaines d'expertise partagés, tels que la volcanologie, les études environnementales, la sismologie et l'évaluation des risques. Forts d'une longue tradition d'excellence dans ces domaines, l'IPGP et l'INGV espèrent accélérer les avancées grâce à l'échange de connaissances, de données et de méthodes.

L'un des points clés de cet accord est l'organisation de réunions biennuelles, coorganisées par l'IPGP et l'INGV. Ces réunions offriront une plateforme permettant aux chercheurs, scientifiques et experts techniques des deux institutions de collaborer et de partager leurs dernières découvertes. La première réunion se tiendra à Paris en septembre 2025, et portera sur les principaux thèmes de recherche communs, tels que la volcanologie, les défis environnementaux et les risques sismiques.

The Institut de physique du globe de Paris (IPGP) and the Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) are pleased to announce the signing of a new Memorandum of Understanding (MoU) on September 12th, 2024. This agreement marks the beginning of a five-year partnership aimed at promoting scientific and technical exchanges between the two leading institutions in the fields of Earth sciences.

The MoU establishes a framework for collaboration that will see the two institutions cooperate in areas of shared expertise, including volcanology, environmental studies, earthquake science, and risk assessment. Both IPGP and INGV have a long-standing history of excellence in these domains, and the agreement is expected to accelerate progress through the exchange of knowledge, data, and methodologies.

One of the key features of the MoU is the establishment of a biannual meeting, co-organized by both IPGP and INGV. These meetings will provide a platform for researchers, scientists, and technical experts from both institutions to collaborate and share their latest findings. The inaugural meeting will take place in Paris in September 2025, focusing on major research themes of mutual interest such as volcanology, environmental challenges, and seismic risks.



Prof. Carlo Doglioni, Directeur de l'INGV, et Marc Chaussidon, Directeur de l'IPGP.
Prof. Carlo Doglioni, Director of the INGV, and Marc Chaussidon, Director of the IPGP.



Visite de l'INGV. Visit to the INGV.

« Nous sommes ravis de formaliser ce partenariat avec l'INGV. Nos deux institutions sont à la pointe de la recherche mondiale en sciences de la Terre, et cette collaboration renforcera nos efforts pour relever les défis scientifiques majeurs liés aux risques naturels. » Marc Chaussidon, Directeur de l'IPGP

« We are excited to formalize this partnership with the INGV. Both our institutions are at the forefront of global research in Earth sciences, and this collaboration will strengthen our efforts to address critical scientific challenges related to natural hazards. » Marc Chaussidon, Director of the IPGP.

« La collaboration entre l'IPGP et l'INGV a le potentiel de stimuler l'innovation et d'approfondir notre compréhension des processus environnementaux et géologiques complexes. Ce protocole ouvre la voie à des initiatives de recherche conjointes qui profiteront à nos institutions et à la communauté scientifique au sens large. » Carlo Doglioni, Directeur de l'INGV

« The collaboration between the IPGP and the INGV has the potential to drive innovation and deepen our understanding of complex environmental and geological processes. This MoU paves the way for joint research initiatives that will benefit both our institutions and the broader scientific community. » Carlo Doglioni, Director of the INGV.

Contact : Marc Chaussidon | chaussidon@ipgp.fr

Chercheurs invités en 2024

Visiting researchers in 2024

Invité Guest	Affiliation Affiliation	Invitant Host	Équipe Team
Delia Braue	Iena Université	Daniel Neuville	Géomatériaux, resp
Adalbert Muhindo	Observatoire Volcanologique de Goma (fonctionnaire)	François Beauducel	Systèmes volcaniques
Matthias Holschneider	Université de Potsdam	Clément Narteau	Dynamique des fluides géologiques
Barbara Sherwood Lollar	University of Toronto	Isabelle Martinez	Géochimie des isotopes stables
Nicola Tosi	DLR	Henri Samuel	Planétologie et sciences spatiales



L'Infrastructure de recherche nationale OZCAR : Observatoires de la zone critique, applications et recherches

The national research infrastructure OZCAR – Critical Zone Observatories, Applications and Research

Entrée dans la feuille de route nationale des Infrastructures de Recherche (IR) en 2016, l'IR OZCAR vise, à l'instar d'autres infrastructures comme ICOS¹, AnaEE² ou EPOS³, à doter la communauté scientifique française d'un instrument destiné à faire de la recherche en environnement d'une manière plus collective et à partager données et produits de la recherche avec la société. La particularité de l'IR OZCAR est d'être une IR distribuée qui ne s'intéresse pas à qu'à une seule variable ou un groupe de variables décrivant un compartiment du système Terre, mais qui a pour ambition une approche holistique, multidisciplinaire, au niveau des régions ou des territoires.

Elle est co-animée par Jérôme Gaillardet, professeur IPGP et Isabelle Braud, Directrice de recherche INRAE à Lyon. Charlotte Dejean et Andy Glondou, également basés à l'IPGP ont rejoint l'IR respectivement en 2024 et 2023 comme ingénieure projet et gestionnaire administratif.

La zone critique est la fine pellicule de la planète à la surface des continents qui héberge la vie. C'est en particulier la zone habitable -et habitée-, par les humains. C'est la zone dont nous dépendons directement pour notre survie, notre intégrité et c'est donc la zone que nous devons particulièrement protéger. Du point de vue du système Terre, c'est une interface, une limite entre les énergies tectoniques, telluriques, qui construisent les reliefs ou les volcans, et l'énergie solaire qui active le cycle de l'eau. Elle est faite d'eau, de roches en décomposition, de sol, d'espèces vivantes macro comme microscopiques,

Included in the French national roadmap for Research Infrastructures (RI) since 2016, OZCAR RI—like other infrastructures such as ICOS¹, AnaEE², or EPOS³—aims to equip the French scientific community with a facility allowing us to conduct an environmental research in a more collective manner and to share data and research products with society. What makes OZCAR unique is that it is a distributed RI, not focused on a single variable or a specific group of variables describing one compartment of the Earth's system, but instead pursuing a holistic, multidisciplinary approach at the regional or territorial level.

The RI is coled by Jérôme Gaillardet, professor at IPGP, and Isabelle Braud, research director at INRAE in Lyon. Charlotte Dejean and Andy Glondou, also based at IPGP, joined the RI in 2024 and 2023 as project engineer and administrative manager, respectively.

The critical zone is the thin layer of the planet at the surface of the continents that hosts life. It is the habitable—and inhabited—zone for humans. It is the zone upon which we directly depend for our survival and well-being, and thus the zone we must particularly protect. From the perspective of the Earth's system, it is an interface—a boundary between tectonic and telluric energies that shape landscapes and volcanoes, and solar energy that drives the water cycle. It is composed of water, decomposing rocks, soil, living organisms both macro and microscopic, and gases—all in constant interaction across geo-eco-hydrological timescales. Understanding it and modeling its

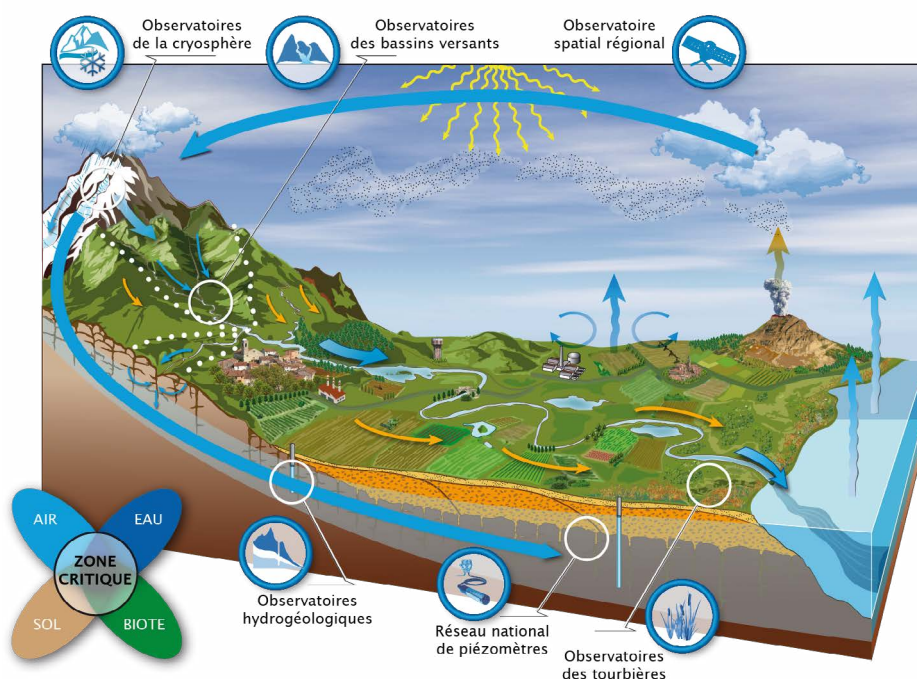
1. Integrated Carbon Observation System, <https://www.icos-cp.eu/>

2. Analyses et Expérimentations sur les Ecosystèmes continentaux, <https://www.anaee-france.fr/>

3. European Plate Observing System, <https://www.epos-france.fr/>

de gaz, tous en interaction constante et selon des temporalités géo-éco-hydrologiques. La comprendre, modéliser son comportement systémique selon les échelles, n'est pas chose facile car ce qui la caractérise est avant tout son hétérogénéité spatiale –par exemple géologique– et temporelle. La zone critique est aussi un des objets planétaires ayant le plus souffert de l'individualisation des sciences durant les derniers siècles. L'écologie, la géologie, l'hydrologie, la géographie, les sciences humaines se parlent peu et ont développé des vocabulaires spécifiques qui, au final, altèrent les récits et les descriptions scientifiques sur ce qui est pourtant l'habitat des sociétés humaines. Dans l'Anthropocène, nous devons être capables de prévoir l'évolution de la ressource en eau –en qualité comme en quantité– de la ressource en sol, de l'habitabilité de nos villes, en réponse à des changements importants de la composition de l'atmosphère ou de la composition du monde vivant. La zone critique est le lieu où « atterrir »⁴ du point de vue politique, car mener une politique de la Terre mondialisée n'est pas la même chose que de conduire une politique de la zone critique⁵.

systemic behavior across different scales is challenging, because the critical zone is characterized above all by its spatial (e.g., geological) and temporal heterogeneity. The critical zone has also suffered greatly from the fragmentation of science over the past centuries. Disciplines like ecology, geology, hydrology, geography, and the social sciences often operate in silos and have developed specific vocabularies, which ultimately weaken scientific narratives and descriptions of what is, in fact, the habitat of human societies. In the Anthropocene, we must be able to forecast the evolution of water resources—in both quality and quantity—soil resources, and the habitability of our cities in response to major changes in atmospheric composition and the living world. The critical zone is where we have to “land”⁴ from a political perspective, because the politics of a globalized Earth is not the politics of the critical zone⁵.



Bloc diagramme représentant la zone critique et ses différents réseaux d'observatoires @mediaterre.
Representation of the critical zone and of the national networks studying the critical zone in France.

4. B. Latour. Ou Atterrir ? Comment s'orienter en politique, Ed. La Découverte, 2017

5. J. Gaillardet. La Terre habitable, ou l'épopée de la zone critique, Ed. La Découverte, 2023.



Campagne d'exploration sismique de la zone critique sur le site de l'observatoire d'Auradé en Gascogne. ©Hubert Raguet.

Seismic exploration of the critical zone in the Auradé observatory, Gascogne, France. ©Hubert Raguet.

L'IR OZCAR fédère ainsi une vingtaine de dispositifs d'observation long-terme créés et financés de manière récurrente par plusieurs organismes de recherche : CNRS, INRAE, IRD et plusieurs universités dont l'IPGP⁶. Pour le CNRS, il s'agit de Services Nationaux d'Observation ou SNO tels qu'ObsERA, crée et hébergé à l'IPGP, l'observatoire des pluies acides (OHGE) en Alsace, le réseau hydrogéologique H+, le réseau des tourbières, le réseau du Karst, le réseau hydrogéochimique HYBAM, le réseau hydro-biogéochimique M-TROPICS, l'observatoire GLACIOCLIM des glaciers, ainsi qu'un ensemble de bassins versants expérimentaux abordant plusieurs problématiques (érosion des sols, contaminations agricoles, crues rapides, etc.) ou des sites dédiés à l'étude des interactions sol- végétation - atmosphère. Certains des sites de ces observatoires accumulent des données depuis plus de 50 ans. En partie grâce aux collaborations tissées par l'IRD, le réseau OZCAR inclut des observatoires de la zone intertropicale.

L'ambition de l'IR OZCAR est de créer une animation technologique et scientifique par-delà ces réseaux le plus souvent disciplinaires (hydrologie, géomorphologie, hydrogéologie, agronomie, télédétection, glaciologie...) pour permettre plus

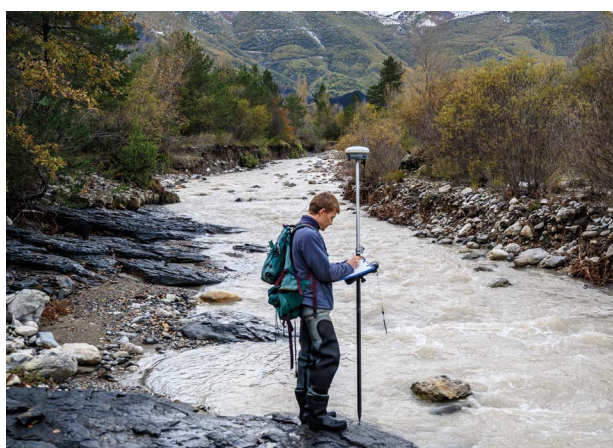
The OZCAR RI brings together around twenty long-term observatories that have been repeatedly funded by various research organizations: CNRS, INRAE, IRD, and several universities, including IPGP⁶. For CNRS, these are National Observation Services (SNOs), such as ObsERA (created and hosted at IPGP), the acid rain observatory OHGE in Alsace, the H+ hydrogeological network, the peatland network, the karst network, the HYBAM hydrogeochemical network, the M-TROPICS hydro-biogeochemical network, the GLACIOCLIM glacier observatory, and a range of experimental watersheds addressing issues such as soil erosion, agricultural contamination, flash floods, etc., or sites dedicated to studying soil-vegetation-atmosphere interactions. Some observatory sites have been collecting data for over 50 years. Thanks in part to partnerships built by IRD, the OZCAR network also includes observatories in the intertropical zone.

OZCAR aims to foster technological and scientific collaboration across these often disciplinary-based networks (hydrology, geomorphology, hydrogeology, agronomy, remote sensing, glaciology...) to encourage greater interdisciplinarity, the emergence of

6. <https://www.ozcar-ri.org>

d'interdisciplinarité, l'émergence de projets transverses utilisant ces observatoires, pour faire également émerger une série de sites instrumentés dans lesquels une approche vraiment holistique peut être mise en œuvre en « épaississant » la question initiale ayant présidé à l'installation de l'observatoire par l'arrivée de nouvelles disciplines et de nouvelles problématiques. Pour ce faire l'IR OZCAR est structurée en « *work packages* » transverses : gouvernance, formation et communication (WP0), système d'information THEIA/OZCAR (WP1), interface données-modèles (WP2), instrumentation et protocoles (WP3), thèmes transverses (WP4), et international (WP5).

cross-cutting projects using these observatories, and the development of fully instrumented sites in which a truly holistic approach can be implemented. This is achieved by expanding the original scientific questions that motivated the creation of the observatories to include new disciplines and issues. OZCAR is structured around transversal work packages: governance, training and communication (WP0), the THEIA/OZCAR information system (WP1), data-model interfaces (WP2), instrumentation and protocols (WP3), transversal themes (WP4), and international activities (WP5).



La source du Lez (SNO Karst) en haut, la Bléone (Observatoire de Draix-Bléone), le site de la Jasse sur le plateau du Larzac (SNO H+) sont quelques uns des observatoires multidisciplinaires d'OZCAR. © Hubert Raguet.

The Source du Lez (SNO Karst) top photo, the Bléone river (Observatoire de Draix-Bléone), the instrumented site of La Jasse (Larzac plateau, H+ SNO) are some of the observatories of the OZCAR network. ©Hubert Raguet.



Le succès de l'IR OZCAR est indéniable. On voit émerger une communauté de jeunes chercheuses et chercheurs plus désireux de traverser les frontières disciplinaires. On assiste au développement de modèles numériques plus situés. L'Equipex CRITEX (2011-2021, PI, J. Gaillardet IPGP) et aujourd'hui l'Equipex+ TERRA FORMA (2020-2028, PI Laurent Longuevergne, Géosciences Rennes) ont véritablement transformé le champ de l'instrumentation au service de l'étude de la zone critique. Un programme ambitieux de formation et de communication a été déployé, associant journées annuelles et visites d'observatoires, des écoles d'été auxquelles de nombreux étudiantes et étudiants de l'IPGP ont participé, mais aussi le cycle de conférences internationales OZCAR-TERENO co-organisé avec le réseau Allemand TERENO⁷. Un bilan annuel des activités de l'IR OZCAR et des résultats scientifiques⁸ les plus saillants est publié chaque année depuis 2020 dans les newsletters OZCAR consultables sur le site web de l'infrastructure. Depuis plusieurs années l'IR attribue l'OZCAR du meilleur ou de la meilleure « critical zoniste » pour un article interdisciplinaire mettant en œuvre une approche zone critique !

The success of the OZCAR RI is undeniable. A community of young researchers eager to cross disciplinary boundaries is emerging. More context-sensitive numerical models are being developed. The Equipex CRITEX (2011-2021, PI: J. Gaillardet, IPGP) and the current Equipex+ TERRA FORMA (2020-2028, PI: Laurent Longuevergne, Géosciences Rennes) have truly transformed instrumentation in critical zone research. An ambitious training and communication program has been rolled out, including annual meetings and observatory visits, summer schools (attended by many IPGP students), and the international OZCAR-TERENO conference series co-organized with the German TERENO network⁷. An annual report on OZCAR-RI activities and key scientific findings has been published since 2020 in the OZCAR newsletters⁸, available on the RI website. For several years now, the RI has also awarded the OZCAR Prize to the best “critical zonist” for an interdisciplinary paper using a critical zone approach!



Gauche : Station météorologique du bassin périurbain de l'Izern (Lyon est visible dans la plaine). Droite : vue des bassins versants de l'observatoire de Draix-Bléone. © Hubert Raguet.

Left : meteorological station in the Izern periurban catchment. Right. The landscape of Draix-Bléone observatory. ©Hubert Raguet

7. Terrestrial Environment Observatories, <https://www.tereno.net/>

8. Publications de l'IR, en ligne sur Zotero : https://www.zotero.org/groups/2769068/ozcar_ri_references/library



La tourbière de Frasne, SNO Tourbière dans le Haut-Doubs. © Hubert Raguet.
The Frasne instrumented peatland observatory, Upper Doubs, France. ©Hubert Raguet

Enfin, du point de vue international, l'IR OZCAR est liée non seulement au réseau international de la zone critique (né aux Etats-Unis dans les années 2000), mais aussi et surtout à l'IR européenne en gestation eLTER⁹, inscrite dans la feuille de route des ESFRI¹⁰. Cette aventure, dans laquelle l'IR OZCAR est associé à l'IR sœur du Réseau des Zones Ateliers¹¹, une infrastructure socio-écologique, vise à créer un réseau européen de sites et de plateformes socio-écologiques délivrant des services à une vaste communauté allant des scientifiques à d'autres porteurs d'enjeux tels que des décideurs politiques, des entreprises, des collectifs du monde associatif et des citoyens.

Le rôle moteur de l'IPGP dans la création et l'animation de l'IR OZCAR a permis, avant même la création de l'infrastructure, d'impliquer les observatoires de l'IR OZCAR dans l'ambitieux programme interdisciplinaire associant Sciences Po, l'USPC (à l'époque Paris-Diderot, Paris Descartes, IPGP) sous la houlette de Bruno Latour et appelé « Politique de la Terre à l'épreuve de l'anthropocène ». Hébergé en partie à l'IPGP, le PEPR TRANSFORM viendra, nous l'espérons, renforcer les sites de l'IR OZCAR et du vaste réseau européen naissant pour travailler la cruciale question de l'habitabilité terrestre.

At the international level, OZCAR is not only connected to the global Critical Zone network (launched in the U.S. in the 2000s), but above all to the emerging European eLTER-RI⁹, included in the ESFRI roadmap¹⁰. This initiative, in which OZCAR is joined by its sister RI, the Zones Ateliers Network¹¹ (a socio-ecological infrastructure), seeks to build a European network of socio-ecological sites and platforms providing services to a wide range of stakeholders—from scientists to policymakers, businesses, NGOs, and citizens.

The leading role played by IPGP in the creation and coordination of OZCAR RI also made it possible, even before the official launch, to involve OZCAR observatories in the ambitious interdisciplinary program "Politics of the Earth in the Anthropocene," a collaboration between Sciences Po and USPC (then Paris-Diderot, Paris Descartes, IPGP) led by Bruno Latour. Partially hosted at IPGP, the PEPR TRANSFORM program is expected to strengthen the OZCAR RI sites and the growing European network to address the crucial issue of planetary habitability.

9. Long term ecological, critical zone and socio-ecological research : <https://elter-ri.eu/>

10. European Strategy Forum on Research Infrastructures, <https://www.esfri.eu/>

11. Réseau des Zones ateliers : <https://www.za-inee.org>



Observatoires, thèmes, plateformes et équipes de recherche

Observatories, themes, platforms and research teams

Au 1^{er} septembre 2024 / On 1st of September 2024

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 BEAUDUCCEL

■ 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 BONAIME

■ 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

Magali ADER

■ 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

■ **Physique des sites naturels / Physics of Natural Sites**

Frédéric GIRAULT

■ **Planétologie et sciences spatiales / Planetology and Space Sciences**

Sébastien RODRIGUEZ

■ **Sismologie / Seismology**

Jean-Philippe METAXIAN

■ **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**
(en remplacement de Marie Boyé au 1^{er} septembre 2024)
- Référent déontologue 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 of directors 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:

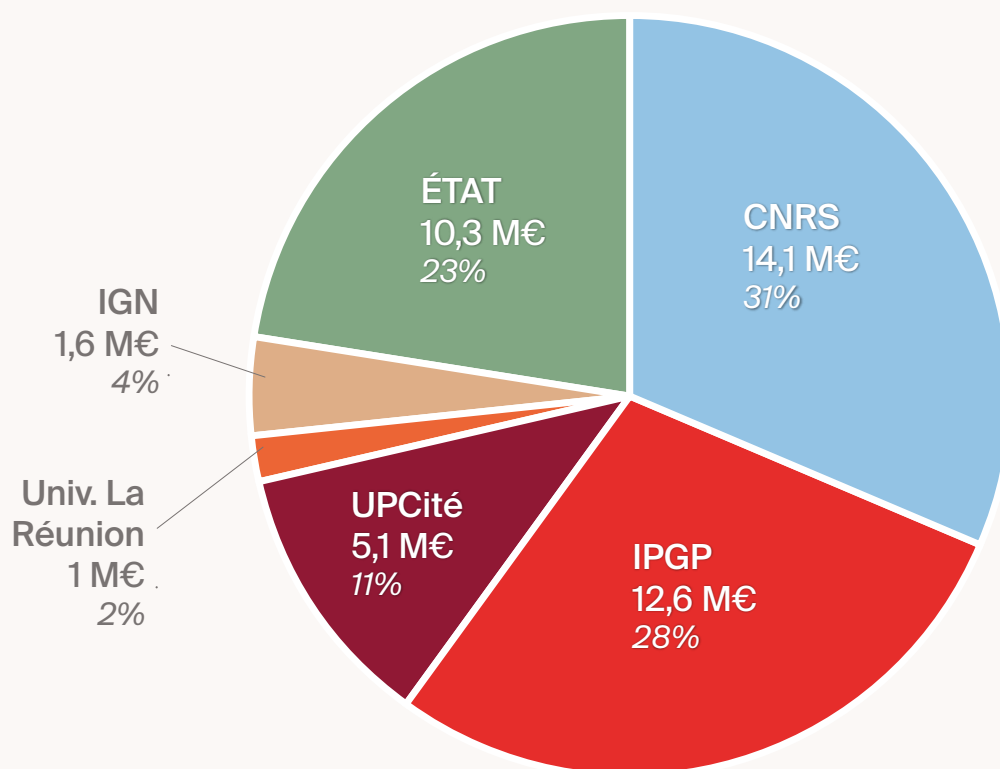
- Equality officer : **Magali Bonifacie**
(replacing Marie Boyé on 1 September 2024)
- Ethics officer and whistleblower : **François Métivier**
- "Public services +" officer : **Marianne Greff**
- Scientific integrity officer : **Julie Carlut**
- Defence security officer : **Antoine Charlot**



Budget

Budget

46 millions d'euros (M€)



Budget complété par l'apport des partenaires sous différentes formes :

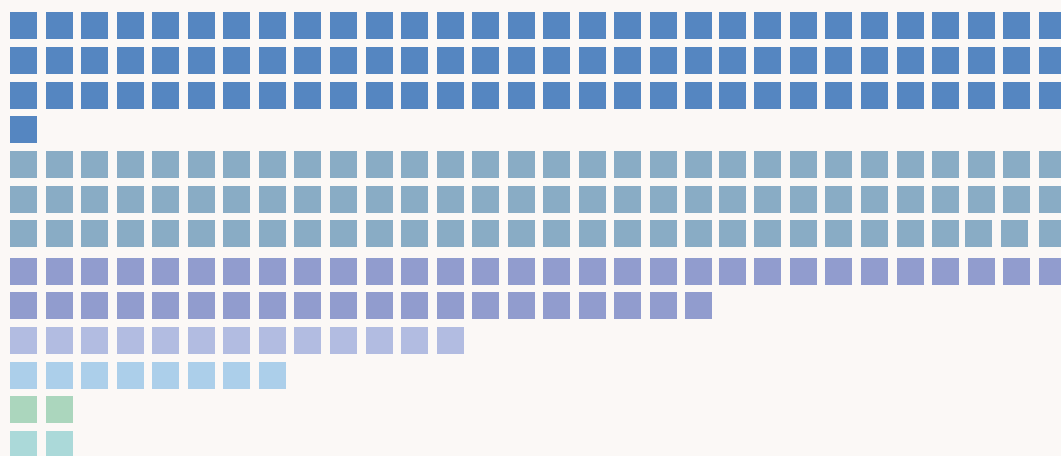
- 3,8 M€ en crédits budgétaires
- 28,2 M€ en nature (307 personnels ETP)



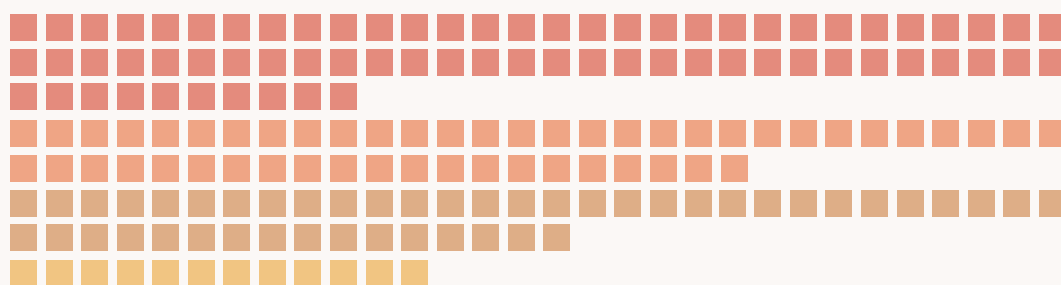
Effectifs Staff

483 personnels en 2024
staff in 2024

256 permanents
permanent staff



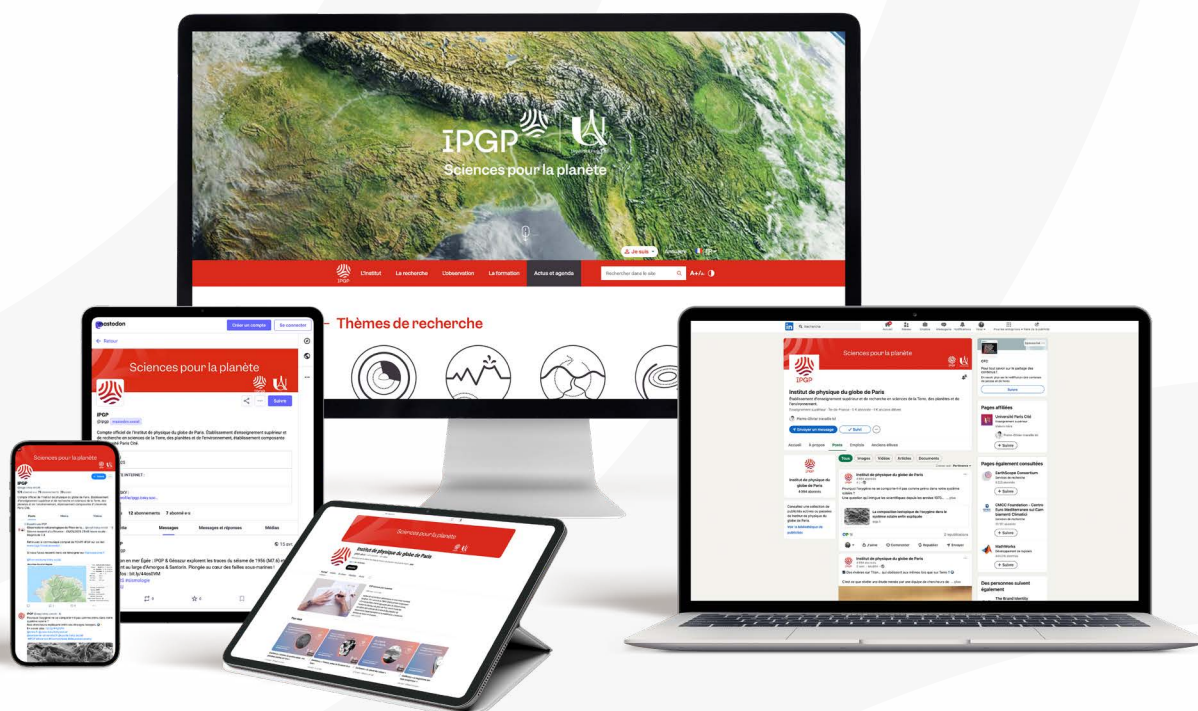
227 non permanents
non-permanent staff



■	91	personnels IPGP IPGP staff	1 directeur director 1 directeur général des services general director of services 7 professeurs professors 4 maîtres de conférences senior lecturers 13 physiciens CNAP CNAP senior physicists 15 physiciens-adjoints CNAP CNAP physicists 5 IATSS engineers, technicians, administrative staff
■	90	personnels CNRS CNRS staff	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	18 professeurs professors 22 maîtres de conférences senior lecturers 12 IATSS engineers, technicians, administrative staff
■	13	personnels IGN IGN staff	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	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	2 IATSS engineers, technicians, administrative staff
■	2	personnels IRD IRD staff	2 chargés de recherche researchers
■	70	doctorants PhD candidates	39 personnels IPGP IPGP staff 7 personnels CNRS CNRS staff 24 personnels Université Paris Cité Université Paris Cité staff
■	51	post-doctorants post-doctoral fellows	32 personnels IPGP IPGP staff 10 personnels CNRS CNRS staff 5 personnels Université Paris Cité Université Paris Cité staff
■	46	IATSS engineers, technicians, administrative staff	43 personnels IPGP IPGP staff 3 personnels Université Paris Cité Université Paris Cité staff
■	12	ITA engineers, technicians, administrative staff	12 personnels CNRS CNRS staff

Rapport annuel Annual report	Institut de physique du globe de Paris 1, rue Jussieu 75238 Paris Cedex 05 www.ipgp.fr
Conception et réalisation Design and production	Service communication - Pierre-Yves Clausse communication@ipgp.fr
Mise en page Layout	Tiphaine Doria
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 Eric Gayer ; focus Ozcar : Hubert Raguét ; Labex UnivEarthS : Dana Berry/Skyworks Digital, Inc./The Kavli Foundation ; page 52 : freepik.com ; page 63 : Wikimedia Commons.
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

