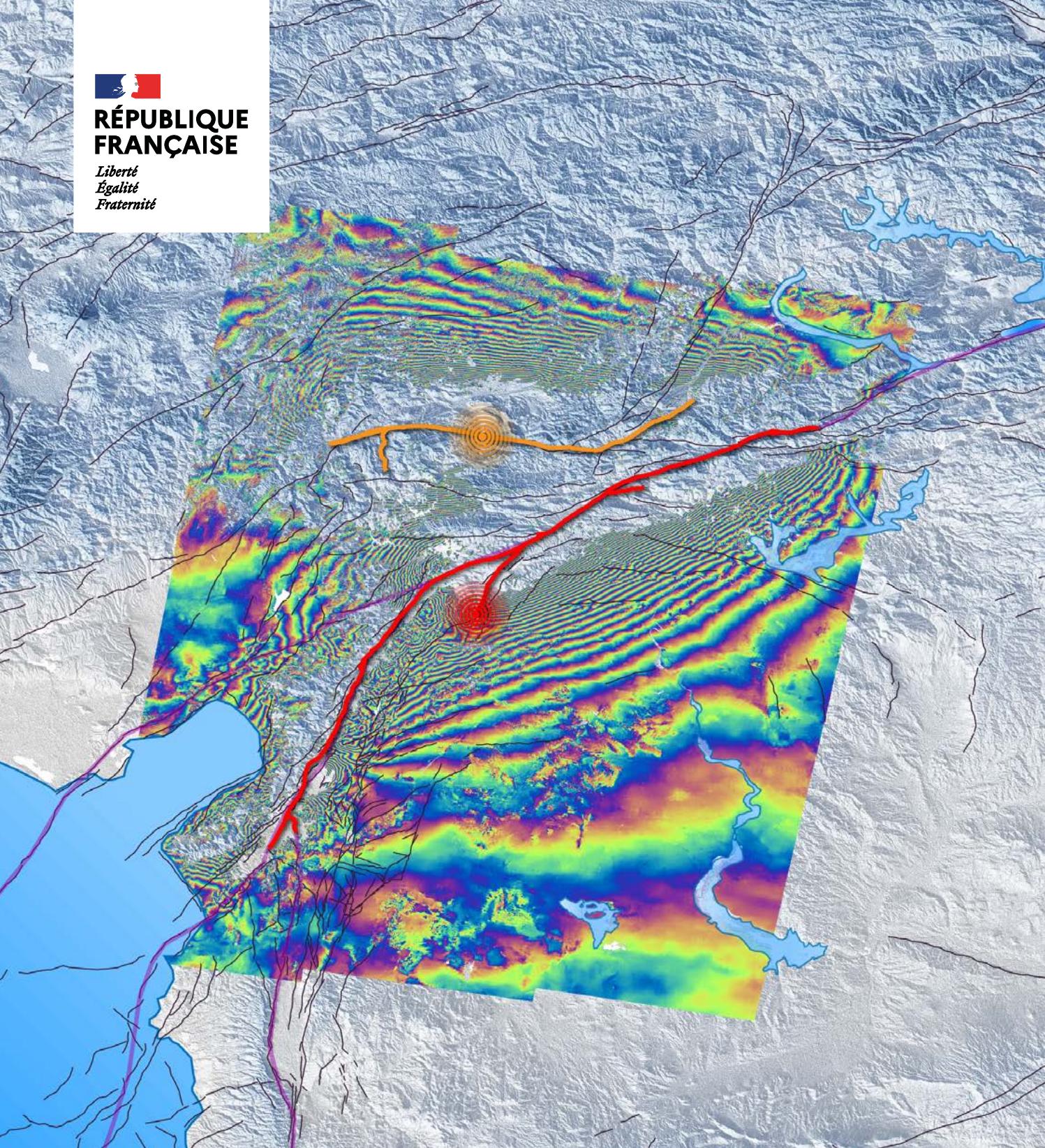




RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Rapport annuel - Annual report 2023

Institut de physique du globe de Paris

IPGP

Université Paris Cité

En couverture

In cover

Interférogramme Sentinel-1 du doublet de séismes qui a frappé la Turquie et la Syrie le 6 février 2023. Le premier tremblement de terre s'est produit près de la ville de Kahramanmaraş à 4h17 heure locale (M 7,8, tracé rouge), rompant un segment de 300 km de long de la faille est-anatolienne. Le second séisme s'est produit le même jour, à 13h24 heure locale (M 7,7, tracé orange), activant la faille voisine de Sürgü-Çardak. Le tracé violet représente la frontière entre les plaques anatolienne (au nord) et arabique (au sud). L'interférogramme combine deux images SAR (Synthetic Aperture Radar) acquises par le satellite Sentinel-1A avant et après le doublet de séismes (29 janvier et 10 février 2023), montrant les déplacements de surface résultant de la déformation cosismique de la lithosphère. Chaque frange de couleur représente un déplacement du sol de 2,8 cm dans la ligne de visée du SAR, se rapprochant ou s'éloignant du satellite. La direction de visée du satellite se fait depuis l'est-sud-est, avec un angle de visée d'environ 35° par rapport à la verticale.

Sentinel-1 interferogram of the doublet of earthquakes that struck Turkey and Syria on 6 February 2023. The first earthquake occurred near the city of Kahramanmaraş at 4.17 am local time (M 7.8, red line), rupturing a 300 km-long segment of the East Anatolian fault. The second event struck on the same day, at 1.24 pm local time (M 7.7, orange line), activating the nearby Sürgü-Çardak fault. The purple line represents the border between the Anatolian (north) and Arabian (south) plates. The interferogram combines two Synthetic Aperture Radar (SAR) images acquired by the Sentinel-1A satellite before and after the earthquake doublet (29 January and 10 February 2023), displaying surface displacement resulting from co-seismic deformation of the lithosphere. Each color fringe represents 2.8 cm ground displacement in the line-of-sight of the SAR, moving either towards or away from the satellite. Satellite viewing direction is from the east-south-east, with a viewing angle of approximately 35° with respect to the vertical.

Crédits : Données Copernicus Sentinel (2023) traitées par Raphaël Grandin avec la chaîne de traitement NSBAS (Doin *et al.*, 2011; Grandin, 2015).
Carte des failles : Zelenin *et al.* (2021). Rupture cosismique : Reitman *et al.* (2023).

Credits: Copernicus Sentinel data (2023) processed by Raphaël Grandin with the NSBAS processing chain (Doin *et al.*, 2011; Grandin, 2015). Fault map: Zelenin *et al.* (2021). Coseismic rupture: Reitman *et al.* (2023).

Sommaire

Contents

 L'IPGP, 100 ans de sciences pour la planète	02	The IPGP, 100 years of science for the planet
 Entretien avec Marc Chaussidon, directeur de l'IPGP et Olivier Peyret, président du CA	04	Interview with Marc Chaussidon, Director of the IPGP and Olivier Peyret, Chairman of the Board of Directors
 En images	08	In pictures
 Focus : Entretien avec Édouard Kaminski, Président de l'université Paris Cité	14	Focus: Interview with Édouard Kaminski, President of Université Paris Cité
 Nouveaux projets de recherche	18	New Research Projects
 Focus : Retour sur le projet Interreg HATARI : les sources des aléas sismiques et volcaniques aux Comores	26	Focus: Back to the Interreg HATARI project: the sources of seismic and volcanic hazards in the Comoros
 Nouveaux instruments	31	New instruments
 Focus : PEPR : l'IPGP s'engage dans trois programmes phares	34	Focus: PEPR: the IPGP is involved in three major programmes
 Prix et distinctions	40	Awards and honours
 Nouveaux chercheurs et enseignants-chercheurs	43	New researchers and professors
 Thèmes IPGP	49	IPGP themes
 Intérieurs de la Terre et des planètes	49	Earth and Planetary Interiors
 Risques naturels	59	Natural Hazards
 Système Terre	67	Earth System Science
 Origines	75	Origins
 Observatoires	87	Observatories
 Focus : IPGP Research Collection	116	Focus: IPGP Research Collection
 Enseignement	119	Education
 Focus : Coup d'œil sur deux thèses	124	Focus: Two PhDs at a glance
		Célia Aranda Reina
		José Grand
 Partenariats et relations internationales	129	Partnerships and international relationships
 Focus : Charlotte Dejean, lauréate 2023 du concours innovation i-PhD de Bpifrance	136	Focus: Charlotte Dejean, the winner of the 2023 i-PhD innovation competition organised by Bpifrance
 Observatoires, thèmes, plateformes et équipes de recherche	138	Observatories, themes, platforms and research teams
 Direction, instances et référents	142	Management, bodies and officers
 Renouvellement des instances de l'IPGP	143	Renewal of the IPGP's governing bodies
 Effectifs	144	Staff
 Budget	146	Budget
 Focus : En librairie	148	Focus: In bookshops

L'IPGP, 100 ans de sciences pour la planète

The IPGP, 100 years of science for the planet

Créé en 1921, l'Institut de physique du globe de Paris est un grand établissement d'enseignement supérieur et de recherche piloté par un conseil d'administration, un conseil scientifique et un conseil pédagogique. Établissement composante de l'université Paris Cité, il assure avec cette dernière ainsi qu'avec le CNRS, l'Université de La Réunion et l'IGN la tutelle de l'UMR 7154 IPGP, qui regroupe l'ensemble des activités de recherche. L'IPGP assure également la tutelle de l'UAR 3454 IPGP, avec le CNRS, qui rassemble toutes les activités d'observation. En outre, il est un laboratoire spatial du CNES.

L'institut rassemble environ 500 personnes recrutées dans le monde entier : chercheurs, ingénieurs, techniciens, agents administratifs, post-doctorants et doctarrants, partageant la même passion pour les sciences de la Terre, des planètes et de l'environnement. De nombreux accords de coopération sont mis en place avec de prestigieuses institutions scientifiques internationales.

Institut de recherche en géosciences de renommée mondiale, l'IPGP étudie la Terre et les planètes depuis le noyau jusqu'aux enveloppes fluides les plus superficielles, à travers l'observation, l'expérimentation et la modélisation. Une attention toute particulière est portée aux observations de longue durée, essentielles pour l'étude des systèmes naturels. L'IPGP a la charge de services d'observation labellisés en volcanologie, sismologie (terrestre et spatiale), magnétisme, gravimétrie et érosion. L'observatoire de Chambon-la-Forêt assure la mesure continue du champ magnétique terrestre depuis 140 ans, tandis que les observatoires permanents de l'IPGP surveillent les quatre volcans actifs français d'outre-mer en Guadeloupe, en Martinique, à la Réunion et à Mayotte. Par ailleurs, l'IPGP équipe et entretient, en partenariat avec l'EOST, deux réseaux géophysiques mondiaux qui suivent les variations du champ magnétique (réseau INTERMAGNET) et l'activité sismique du globe (réseau GEOSCOPE).

Created in 1921, the Institut de physique du globe de Paris is a major institution for higher education and research, governed by a board of directors, a scientific and education councils. As a component of the Université Paris Cité, it supervises with it and with the CNRS, the Université de La Réunion and the IGN, the UMR 7154 IPGP, which brings together all the research activities. The IPGP also supervises with the CNRS the UAR 3454 IPGP, which includes all observation activities. In addition, it is a CNES space laboratory.

The institute brings together around 500 people recruited from all over the world: researchers, engineers, technicians, administrative staff, post-doctoral researchers and PhD candidates sharing the same passion for Earth, planetary and environmental sciences. Numerous cooperation agreements are in place with prestigious international scientific institutions.

A world-renowned geoscience institute, the IPGP studies the Earth and the planets from the core to the most superficial fluid envelopes, through observation, experimentation and modelling. Special attention is given to long-term observations that are essential for the study of natural systems. The IPGP is in charge of labelled observation services in volcanology, seismology (both terrestrial and spatial), magnetism, gravimetry and erosion. The Chambon-la-Forêt observatory has been continuously measuring the Earth's magnetic field for 140 years, while the IPGP's permanent observatories monitor the four active French overseas volcanoes in Guadeloupe, Martinique, Réunion Island and Mayotte. In addition, the IPGP equips and maintains, in partnership with the EOST, two global geophysical networks that monitor magnetic field variations (INTERMAGNET network) and global seismic activity (GEOSCOPE network).



L'IPGP héberge des moyens de calcul puissants, des plateformes expérimentales et analytiques de dernière génération et bénéficie d'un soutien technique de premier plan. Sa structure souple facilite les interactions entre les 17 équipes de recherche travaillant ensemble sur les quatre grandes thématiques de l'institut : Intérieurs de la Terre et des planètes, Risques naturels, Système Terre et Origines.

Enfin, l'IPGP est responsable de plusieurs formations en licence, master et doctorat, en partenariat avec l'université Paris Cité.

The IPGP hosts powerful computing resources, state-of-the-art experimental and analytical facilities and benefits from first-class technical support. Its flexible structure facilitates interaction between the 17 research teams working together on the four main themes of the institute: Interiors of the Earth and Planets, Natural Hazards, Earth System and Origins.

Finally, the IPGP is responsible for several bachelor's, master's and doctoral courses, in partnership with the Université Paris Cité.

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



L'année 2023 a marqué la fin des célébrations du centenaire de l'IPGP, créé en 1921 à l'initiative de son premier directeur Charles Maurain (1871-1967), avec à la fois la publication d'un ouvrage revenant sur 100 ans d'histoire et de progrès scientifiques majeurs, la mise en ligne du nouveau site internet et l'organisation d'une journée de conférences et débats autour du thème des Géosciences de demain. Mieux qu'un long discours, le panorama présenté dans ce rapport des observations géophysiques réalisées par les membres de l'institut sur toute la planète, et même sur Mars, ainsi que des avancées scientifiques à leur actif, démontre la justesse de la vision développée il y a un siècle de faire évoluer les sciences de la Terre vers une approche quantitative et intégrée des processus naturels.

L'IPGP d'aujourd'hui est toujours aux avant-gardes des recherches en sciences de la Terre au sens large, comme le montre notamment sa dynamique de publication saluée par la dixième place mondiale, troisième européenne et première française de l'université Paris Cité/IPGP au classement thématique 2023 de Shangaï. En outre, ses thématiques de recherche évoluent pour faire face aux défis du 21^{ème} siècle, en parfait accord avec la nouvelle signature d'UPCité "Santé planétaire : des humains en bonne santé, au sein de sociétés en bonne santé, sur une planète en bonne santé".

The year 2023 marked the end of the centenary celebrations of the IPGP, created in 1921 on the initiative of its first director Charles Maurain (1871-1967), with the publication of a book looking back over 100 years of history and major scientific advances, the launch of the new website and the organisation of a day of conferences and debates on the theme of the Geosciences of Tomorrow. Better than a long speech, the panorama presented in this report of the geo-physical observations made by members of the institute all over the planet, and even on Mars, as well as the scientific advances to their credit, demonstrates the accuracy of the vision developed a century ago of moving the Earth sciences towards a quantitative and integrated approach to natural processes.

Today's IPGP is still at the forefront of research in the Earth sciences in the broadest sense, as demonstrated by its publication rate, rewarded by the Université Paris Cité/IPGP's tenth place in the world, third place in Europe and first place in France in the Shanghai 2023 thematic rankings. In addition, its research themes are evolving to meet the challenges of the 21st century, in perfect keeping with UPCité's new slogan "Planetary health: healthy humans in healthy societies on a healthy planet".

Ces changements se traduisent également par une nouvelle étape franchie en 2023 du côté de la formation, avec la mise en place d'une troisième année de Licence pour nos deux parcours d'excellence : le bachelor "Politiques de la Terre" avec Sciences Po, qui vise à former des étudiants aux enjeux liés à l'environnement qu'ils soient scientifiques, politiques ou juridiques, et le Cycle Pluridisciplinaire d'Études Supérieures (CPES), parcours "Environnement et Energies Nouvelles", avec le lycée Janson de Sailly, conçu pour former les étudiants aux problématiques énergétiques, environnementales et sanitaires contemporaines.

L'année 2023 a aussi vu le démarrage et la finalisation d'actions patrimoniales essentielles pour le futur de nos observatoires. Les clefs de l'ancien observatoire du Morne des Cadets (construit en 1935 et confié à l'IPGP en 1946) ont été remises à la Collectivité Territoriale de Martinique,

These changes are also reflected in a new stage in the education offering in 2023, with the introduction of a third year of the Bachelor's degree for our two courses of excellence: the "Earth Policies" bachelor with Sciences Po, which aims to train students in environmental issues, whether scientific, political or legal, and the "Environment and New Energies" multidisciplinary cycle of higher education (CPES) with the Janson de Sailly high school, designed to train students in contemporary energy, environmental and health issues.

The year 2023 also saw the start and finalisation of heritage projects that are essential for the future of our observatories. The keys to the old Morne des Cadets observatory (built in 1935 and entrusted to the IPGP in 1946) were handed over to the Collectivité Territoriale de Martinique,



Équipe de direction 2023 (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.

2023 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.



actant l'achèvement de l'installation de l'OVSM-IPGP dans le nouvel observatoire. En Guadeloupe, le conseil départemental a accordé à l'IPGP la dévolution et la rénovation du bâtiment Ciel Mer jouxtant le bâtiment de l'OVSG-IPGP sur le site du Houëlmont, ce qui permettra de réorganiser les laboratoires et de développer avec le conseil départemental un espace muséal. À La Réunion, la reconstruction de l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise, dont les locaux actuels datent de 1979, a obtenu un accord de principe de la part de la Région. Enfin, les bâtiments de l'observatoire national magnétique de Chambon-la-Forêt, construit pour l'IPGP en 1936, ont connu des travaux importants de rénovation énergétique.

Une fois encore, nous sommes fiers de présenter dans ce rapport le travail accompli par les équipes de l'IPGP, qu'elles soient scientifiques, administratives ou techniques.

completing the installation of the OVSM-IPGP in the new observatory. In Guadeloupe, the Departmental Council granted the IPGP the devolution and renovation of the Ciel Mer building adjoining the OVSG-IPGP building on the Houëlmont site, which will enable the laboratories to be reorganised and a museum area to be developed with the Departmental Council. In Réunion, the Region has agreed in principle to rebuild the Piton de la Fournaise volcano-logical observatory, whose current premises date back to 1979. Finally, the buildings of the national magnetic observatory at Chambon-la-Forêt, built for the IPGP in 1936, have undergone major energy renovation work.

Once again, we are proud to present in this report the work accomplished by the IPGP's scientific, administrative and technical teams.



Nouvel observatoire volcanologique et sismologique de Martinique (OVSM-IPGP).
New volcanological and seismological observatory of Martinique (OVSM-IPGP).

En chiffres

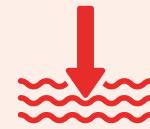
In figures

En lisant ce rapport, vous apprendrez que...

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

**3**

stations sous-marines autonomes ont été développées par l'IPGP pour assurer une surveillance en temps réel au large de Mayotte *via* de nouveaux moyens de communication acoustique (p. 32). autonomous underwater stations have been developed by the IPGP to provide real-time monitoring off Mayotte using new acoustic communication methods (p. 32).

**200**

mètres de profondeur minimum caractérisent les fonds marins étudiés par le PEPR "Grands fonds marins" dans lequel l'IPGP est impliqué (p. 34). metres deep or more characterize the deep-sea environments studied by the PEPR "Deep Sea", in which the IPGP is involved (p. 34).

**1650**

C'est la longueur en kilomètres (± 20 km) du rayon du noyau métallique de la planète Mars suite à de nouvelles estimations de chercheurs de l'IPGP (p. 56). This is the length in kilometres (± 20 km) of the radius of the metallic core of the planet Mars, according to new estimates by IPGP researchers (p. 56).

**60**

millions de m³ de roches volcaniques se sont subitement effondrées lors du glissement de terrain de Mahavel en 1965 à La Réunion, parcourant une distance totale de 5 km (p. 60). million of m³ of volcanic rock suddenly collapsed during the Mahavel landslide in 1965 in Réunion, covering a total distance of 5 km (p. 60).

**5**

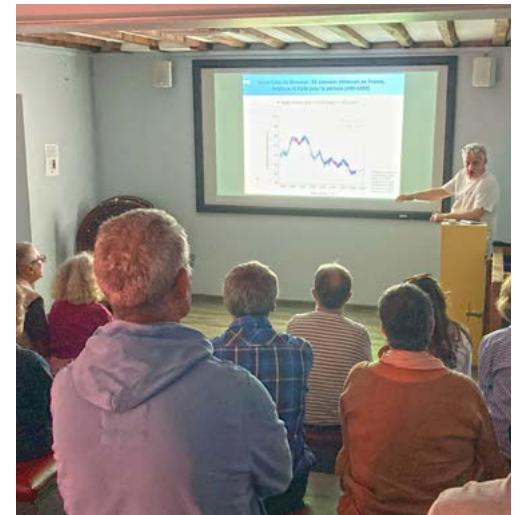
minutes suffisent pour déterminer de manière fiable la magnitude et le mécanisme d'un grand séisme en utilisant conjointement les signaux élasto-gravitationnels précoce (PEGS) et des phases W proches (p. 64). minutes is all it takes to reliably determine the magnitude and mechanism of a major earthquake using early elasto-earthquake signals (PEGS) and nearby W phases (p. 64).

**200 °c**

ont été dépassés pour la première fois par les fumerolles de la Soufrière de Guadeloupe au niveau du Cratère Sud (p. 102). were exceeded for the first time in the fumaroles of the Soufrière of Guadeloupe at the South Crater (p. 102).

En images

In pictures



Comme chaque année, les personnels de l'observatoire magnétique national de Chambon-la-Forêt sont heureux d'accueillir petits et grands lors de la Fête de la science.

As every year, the National Magnetic Observatory staff at Chambon-la-Forêt are pleased to welcome visitors of all ages to the Fête de la science.



En collaboration avec la Cité du Volcan, les équipes de l'OVPF-IPGP font découvrir aux scolaires et au grand public leur métier et les techniques de surveillance du Piton de la Fournaise dans le cadre de la Fête de la science.

In collaboration with the Cité du Volcan, the OVPF-IPGP teams are giving schoolchildren and the general public an insight into their work and the techniques used to monitor the Piton de la Fournaise as part of the Fête de la science.



Soirée arts et sciences sur le thème "Atterrir en zone critique", organisée à l'IPGP afin d'explorer les différentes facettes de la zone critique à travers les œuvres d'un compositeur, d'une cinéaste, d'un géochimiste et d'une architecte-cartographe.

An arts and sciences evening on the theme of "Landing in the critical zone", organised at the IPGP to explore the different facets of the critical zone through the works of a composer, a filmmaker, a geochemist and an architect-cartographer.



Fête des personnels organisée par l'université Paris Cité placée sous le signe du jeu et du partage.
The staff celebration organized by the Université Paris Cité is all about games and sharing.

Journée scientifique exceptionnelle pour célébrer le centenaire de l'IPGP au Muséum national d'Histoire naturelle, alternant conférences et débats pour croiser les disciplines et penser les géosciences de demain.

An exceptional scientific day to celebrate the centenary of the IPGP at the Muséum national d'Histoire naturelle, alternating lectures and debates to cross disciplines and think about the geosciences of tomorrow.





Remise des diplômes de master aux étudiants IPGP à l'université Paris Cité.
IPGP students receive their master's degrees at the Université Paris Cité.



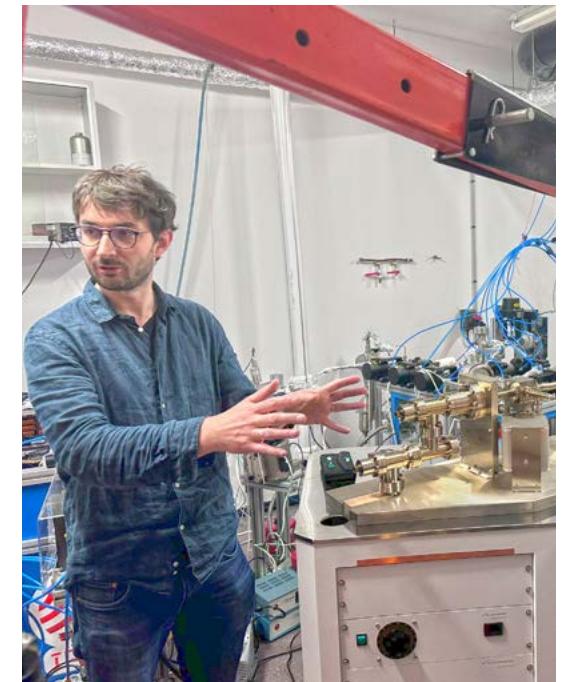
Congrès des doctorants 2023, associant les deux composantes de l'école doctorale STEP'UP, "Terre et Environnement" et "Physique de l'Univers" sur le thème "Scientific methods as a bridge between disciplines".

2023 PhD Candidates Congress, bringing together the two components of the STEP'UP doctoral school, "Earth and Environment" and "Physics of the Universe", on the theme of "Scientific methods as a bridge between disciplines".



Guillaume Avice, de l'équipe de cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale (CAGE), installe le nouveau spectromètre de masse Noblesse HR 3F6M.

Guillaume Avice, from the Cosmochemistry, Astrophysics and Experimental Geophysics team (CAGE) installs the new Noblesse HR 3F6M mass spectrometer.





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

Interview with Édouard Kaminski, President of Université Paris Cité

**Que représente pour vous votre
élection, seulement quelques années
après la création de cette nouvelle
université ?**

La création de l'université Paris Cité s'inscrivait dans une dynamique nationale et une nouvelle ambition pour l'enseignement supérieur et la recherche en France : faire émerger une dizaine d'universités d'rang mondial, en appuyant leur projet par une dotation financière spécifique (les fonds IdEx, pour Initiative d'Excellence). Aujourd'hui la première étape du pari est tenue : l'université Paris Cité, issue de la fusion de Paris Diderot et de Paris Descartes et de l'intégration de l'IPGP est aujourd'hui 69^e mondiale et 4^e française dans le classement de Shanghai, et 1^{re} française et 35^e mondiale au classement de Leiden pour les 10 % des articles scientifiques les plus cités. Demain, et c'est l'objectif principal de mon mandat, cette nouvelle université doit consolider ses acquis et renouveler son ambition de se positionner au meilleur niveau international, tout en gagnant en efficacité de gestion et en capacité de pilotage en interne. Pour le dire autrement, l'enjeu n'est ni de se reposer sur nos lauriers, ni de ne s'occuper que des problématiques du quotidien, mais de travailler sur la notion d'excellence dans tous les domaines : rayonnement de la recherche et impact de nos activités de valorisation, attractivité de la formation et qualité de l'insertion professionnelle des étudiants, renforcement de notre politique pour le développement durable et la responsabilité sociétale et environnementale, amélioration continue de la qualité de vie et des conditions de travail.

What does your election mean to you, just a few years after the creation of this new university?

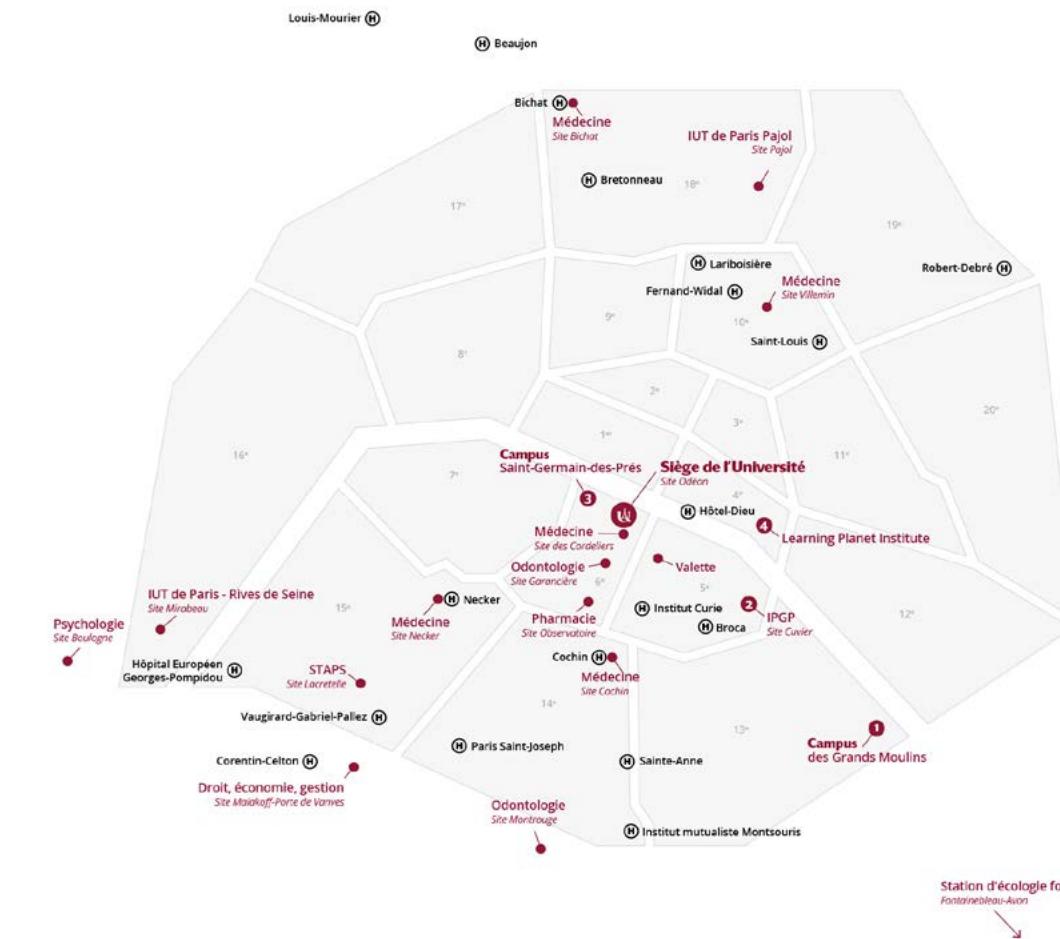
The creation of Université Paris Cité was part of a national strategy and a new ambition for higher education and research in France: to encourage the emergence of ten or so world-class universities, by supporting their projects with a specific financial endowment (the IdEx funds). Today, the first stage of this gamble has been achieved: Université Paris Cité, the result of the merger of Paris Diderot and Paris Descartes and the integration of the IPGP, is now ranked 69th in the world and 4th in France in the Shanghai rankings, and 1st in France and 35th in the world in the Leiden rankings for the top 10 % of scientific articles cited. Tomorrow, and this is the main objective of my term of office, this new university must consolidate its achievements and renew its ambition to position itself at the highest international level, while improving its management efficiency and internal steering capacity. To put it another way, the challenge is neither to rest on our laurels nor to deal only with day-to-day issues, but to work on the notion of excellence in all areas: the influence of our research and the impact of our development activities, the attractiveness of our training and the quality of the professional integration of our students, the strengthening of our policy for sustainable development and social and environmental responsibility, and the continuous improvement of the quality of life and working conditions.

Quelle place l'IPGP occupe-t-il pour vous au sein de cet établissement ?

L'IPGP est emblématique du projet porté par l'université Paris Cité a plus d'un titre. En recherche tout d'abord, il est l'exemple type d'un institut au meilleur niveau international, et nous place à la 10^e place mondiale en sciences de la Terre dans le classement thématique de Shanghai. En formation, l'IPGP porte l'ensemble de la filière Sciences de la Terre, Planètes, Environnement, de la licence jusqu'au doctorat et donne une grande visibilité à notre université dans ces domaines. Mais l'IPGP est également au centre de nombreuses initiatives interdisciplinaires qui sont la marque de fabrique de l'université Paris Cité : le LabEx UnivEarthS avec l'astrophysique, la licence ASTER avec les langues orientales, le Centre des Politiques de la Terre qui traite des problématiques de l'Anthropocène aux carrefours des sciences naturelles et des sciences humaines et sociales.

What role does the IPGP play in your institution?

The IPGP is emblematic of the Université Paris Cité project in many ways. Firstly, in terms of research, it is a typical example of an institute at the highest international level, ranking 10th in the world in Earth Sciences in the Shanghai thematic rankings. In terms of education, the IPGP runs the entire Earth, Planetary and Environmental Sciences programme, from undergraduate to doctoral level, and gives our university a high profile in these fields. But the IPGP is also at the centre of a number of interdisciplinary initiatives that are the hallmark of the Université Paris Cité: the LabEx UnivEarthS with astrophysics, the ASTER degree with oriental languages, and the Centre des Politiques de la Terre (Earth Policy Centre), which deals with Anthropocene issues at the crossroads of the natural sciences and the humanities and social sciences.



Enfin, l'IPGP porte des missions nationales pour l'observation des phénomènes telluriques, et en particulier les observatoires volcanologiques et sismologique en Outre-mer : c'est un des marqueurs forts de l'impact sociétal de notre établissement.

Que signifie la nouvelle signature de l'université sur la santé planétaire ?

Cette signature traverse les trois Facultés (Sciences, S&H et Santé), l'IPGP bien sûr, ainsi que l'Institut Pasteur, organisme de recherche associé à UPCité depuis 2021. Cette signature fournit un cadre cohérent pour affirmer l'impact sociétal de l'établissement :

Des êtres humains en bonne santé, dans des sociétés en bonne santé, sur une planète en bonne santé.

Cette signature se décline notamment en :

- les enjeux de l'Anthropocène à la confluence des sciences formelles, naturelles et expérimentales, et des sciences humaines et sociales ;
- la santé globale impliquant tout le spectre de la santé, du sens strict au sens large ("from bench to bed", et incluant également la psychologie, les sciences du sport, etc.) pour faire face aux grands défis sanitaires des sociétés modernes (maladies non transmissibles, pandémies, vieillissement de la population) ;
- l'humain face aux défis d'un monde en transition (climatique, technologique, sociétale, etc.).

Pour l'IPGP, il me semble que la santé planétaire permet aux scientifiques qui étudient le système Terre de manipuler un concept frontière créant et animant l'interface avec d'autres communautés. Par exemple, les médecins travaillant sur les marqueurs isotopiques de certaines maladies, les sociologues travaillant sur les inégalités environnementales, les géographes et économistes travaillant sur le cycle de production et de vie des plastiques pour lutter contre l'impact de la pollution aux microplastiques, les biologistes travaillant sur les gènes d'antibiorésistance trouvés dans les sédiments, etc. Le travail est particulièrement ambitieux car ce dialogue, comme tout travail interdisciplinaire, nécessite un

Finally, the IPGP is involved in national missions to observe Earth phenomena, in particular the volcano-logical and seismological observatories in the French overseas territories: this is one of the strongest indicators of our institution's impact on society.

What does the university's new signature mean for global health?

This signature crosses the three Faculties (Sciences, S&H and Health), the IPGP of course, as well as the Institut Pasteur, a research organisation associated with UPCité since 2021. This signature provides a coherent framework for asserting the institution's societal impact:

Healthy human beings, in healthy societies, on a healthy planet.

This signature includes:

- the challenges of the Anthropocene at the confluence of the formal, natural and experimental sciences, and the human and social sciences;
- global health, involving the entire spectrum of health, from the strictest to the broadest sense ("from bench to bed", and also including psychology, sports science, etc.), in order to meet the major health challenges of modern societies (non-communicable diseases, pandemics, ageing populations);
- the human face of the challenges of a world in transition (climatic, technological, societal, etc.).

For the IPGP, it seems to me that planetary health enables scientists who study the Earth system to manipulate a frontier concept that creates and drives the interface with other communities. For example, doctors working on the isotopic markers of certain diseases, sociologists working on environmental inequalities, geographers and economists working on the production and life cycle of plastics to combat the impact of microplastic pollution, biologists working on the antibiotic resistance genes found in sediments, and so on. The work is particularly ambitious because this dialogue, like all interdisciplinary work, requires a process of translation, exchange of data and common methodologies. It is a truly interdisciplinary process in which the positions of each discipline are changing,

processus de traduction, d'échange de données et de méthodologies communes. C'est un vrai processus interdisciplinaire dans lequel les positions de chaque discipline changent, les sciences de la Terre mettant l'Homme dans leurs objets d'étude ; les sciences humaines, sociales et médicales mettant la Terre dans leurs objets d'étude. Incrire ces efforts dans le temps long est indispensable ; c'est ce que permet l'affirmation de la signature de l'établissement.

Comment conciliez-vous vos attributions de président et de géophysicien ?

Avant de les concilier, je m'en nourris. Ma formation et ma pratique de géophysicien m'ont permis d'appréhender les systèmes complexes, l'apport de l'expérimentation, les enjeux du temps long. Tout cela est très utile quand on est président d'un tel vaisseau amiral de l'enseignement supérieur et de la recherche. Savoir là d'où l'on vient, garder à l'esprit la réalité du terrain de la recherche et de l'enseignement est par ailleurs indispensable si l'on veut être un dirigeant connecté à la communauté de son établissement et capable de répondre à ses attentes. Malheureusement une activité de recherche de haut niveau est impossible à maintenir à mon poste actuel ; la recherche à l'IPGP requiert un investissement total ! J'arrive cependant à conserver une activité d'enseignement : le contact avec les étudiants est indispensable pour se ressourcer.

with the Earth sciences including Man in their objects of study and the human, social and medical sciences including the Earth in their objects of study. It is essential that these efforts are set in stone over the long term, and this is what is achieved by affirming the institution's signature.

How do you reconcile your roles as President and geophysicist?

Before reconciling them, I take inspiration from them. My training and practice as a geophysicist have given me a deep understanding of complex systems, the contribution of experimentation and the challenges of the long term. All this is very useful when you are president of such a flagship for higher education and research. Knowing where you come from and keeping in mind the realities on the ground in research and teaching is also essential if you want to be a leader who is connected to the community of your institution and capable of meeting its expectations. Unfortunately, it is impossible to maintain a high level of research activity in my current position; research at the IPGP requires total investment! However, I do manage to keep up a teaching activity: contact with students is essential to recharge one's batteries.

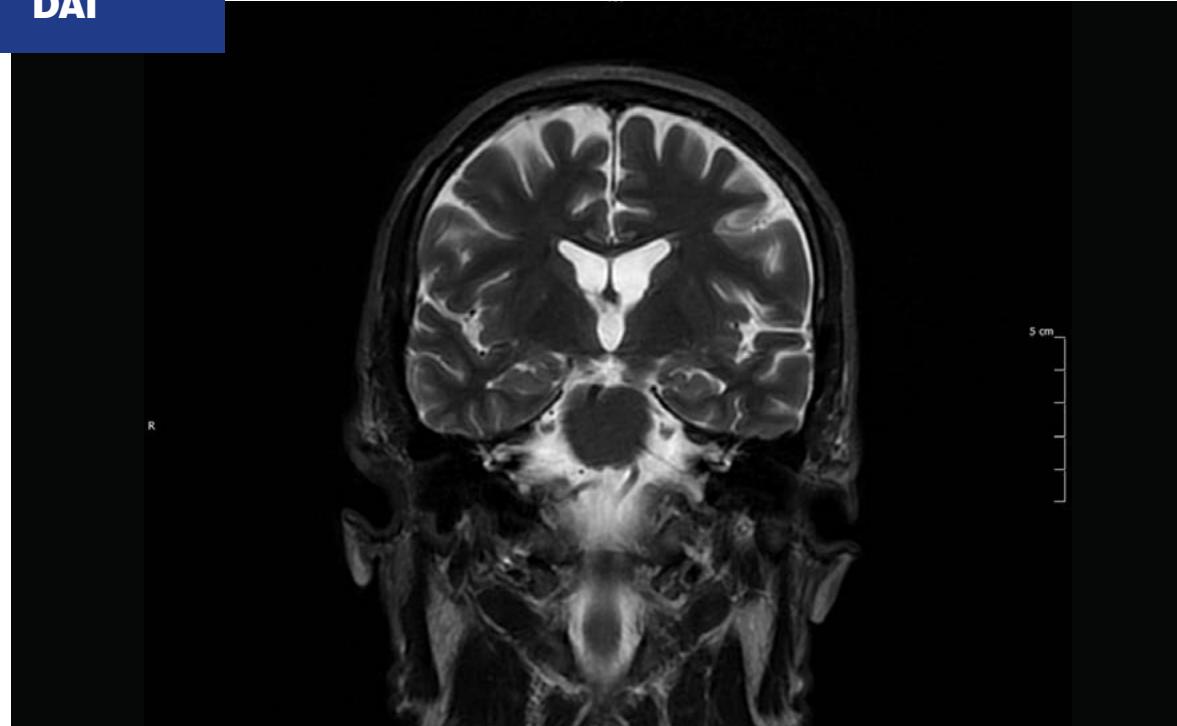


Nouveaux projets de recherche

New Research Projects



Projets européens EU projects

DAI

Diagnostiquer la maladie d'Alzheimer grâce aux isotopes

En se basant sur les développements technologiques obtenus lors de la précédente ERC Pristine qui visait à réaliser des mesures isotopiques des métaux (Zn, Cu...) dans les échantillons extra-terrestres pour la compréhension de la formation des planètes, le projet DAI propose de suivre les changements isotopiques stables au sein des organismes, ouvrant ainsi une nouvelle voie pour étudier l'homéostasie des métaux ainsi que de nouveaux moyens de détection et de diagnostic des maladies, en particulier celle d'Alzheimer.

Projet ERC Proof of Concept, porté par Frédéric Moynier de l'équipe de cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale.

Diagnose Alzheimer's disease with isotopes

Building on the technological advancements achieved during the previous Pristine ERC project, which focused on isotopic measurements of metals (Zn, Cu, etc.) in extraterrestrial samples to understand planet formation, the DAI project aims to monitor stable isotopic changes within organisms. This approach opens up new avenues for studying metal homeostasis and offers innovative methods for detecting and diagnosing diseases, particularly Alzheimer's disease.

ERC Proof of Concept project, led by Frédéric Moynier from the Cosmochemistry, Astrophysics and Experimental Geophysics team.

MEDINCIRCLE

Préparer l'avenir de la filière agroalimentaire méditerranéenne à travers une gestion intégrée et circulaire de l'eau, des nutriments et des bioressources exempts de contaminants

Ce projet vise à relever les défis posés par le changement climatique, la pénurie d'eau et l'insécurité alimentaire en région méditerranéenne, en se concentrant sur l'agriculture et la production alimentaire. Son objectif est d'améliorer le développement durable et la résilience de l'industrie en révolutionnant les pratiques de gestion de l'eau, des nutriments et des déchets.

Projet ERA-LEARN, appel PRIMA section 2, porté par Eric Van Hullebusch de l'équipe de biogéochimie à l'Anthropocène des éléments et contaminants émergents.

Future-proofing the Mediterranean agri-food chain through integrated and circular management of contaminant-safe water, nutrients and bioresources

This project aims to tackle the challenges of climate change, water scarcity, and food insecurity in the Mediterranean region, with a particular focus on agriculture and food production. Its goal is to enhance the sustainability and resilience of the industry by revolutionizing water, nutrient, and waste management practices.

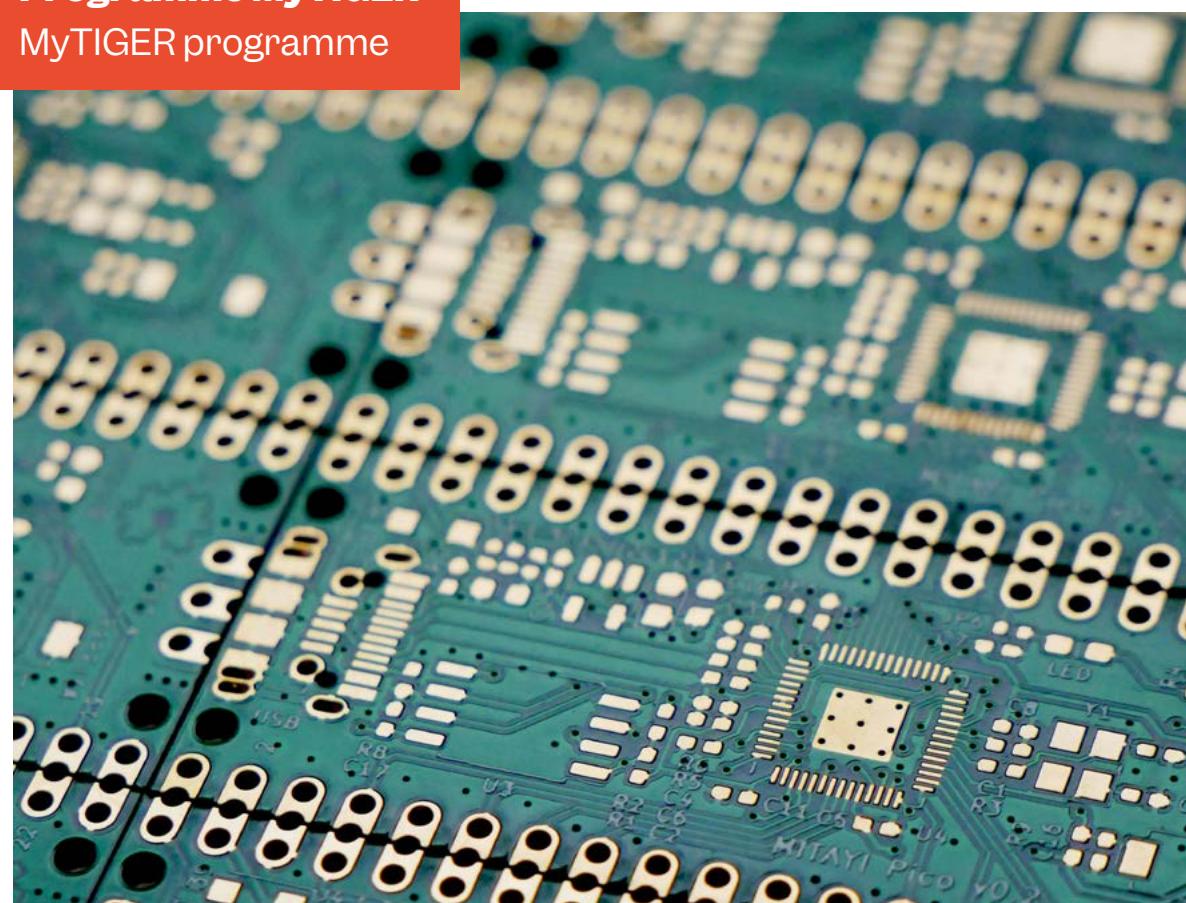
ERA-LEARN project, PRIMA section 2 call, led by Eric Van Hullebusch from the Biogeochemistry at the Anthropocene of Elements and Emerging Contaminants team.



Projet international International project

Programme MyTIGER

MyTIGER programme



Biolixivation sélective de l'or contenu dans les déchets électroniques et récupération de l'or dans les solutions de biolixivation à l'aide de matériaux adsorbants à base de fer et de coquille de palme

Ce projet vise à extraire sélectivement l'or présent dans les déchets électroniques, en particulier les circuits imprimés, à l'aide d'un procédé de biolixivation en deux étapes utilisant deux consortiums bactériens distincts, tout en s'attaquant aux problèmes liés à la toxicité des métaux sur ces consortiums bactériens et à la mise en œuvre de matériaux adsorbant l'or à base de fer et de coquille de palme.

Programme de collaboration scientifique
France-Malaisie, porté par Eric Van Hullebusch de l'équipe de biogéochimie à l'Anthropocène des éléments et contaminants émergents.

Selective bioleaching of gold from e-waste and gold recovery from pregnant bioleaching solutions by autonomous iron/palm shell microbots

This project aims to selectively extract gold from electronic waste, particularly printed circuit boards, using a two-stage bioleaching process with two distinct bacterial consortia. It addresses the challenges posed by metal toxicity to these bacterial consortia and utilizes gold-adsorbing materials based on iron and palm shell.

France-Malaysia Collaboration Programme for Joint Research, led by Eric Van Hullebusch from the Biogeochemistry at the Anthropocene of Elements and Emerging Contaminants team.



Projets nationaux ANR ANR National projects

3VER



Vers des verres plus vertueux

L'objectif de ce projet est de trouver des solutions pour rendre la production de verre plus respectueuse de l'environnement en développant des compositions alternatives et des processus de fusion neutres en carbone, en utilisant des matériaux et des outils tels que la lave volcanique et des fours électriques.

Projet "Science avec et pour la société", porté par Daniel Neuville de l'équipe de géomatériaux.

Towards greener glass

The aim of this project is to find solutions to make glass production more environmentally sustainable by developing alternative compositions and carbon-neutral melting processes, using materials and tools such as volcanic lava and electric ovens.

"Science with and for society" project, led by Daniel Neuville from the Geomaterials team.

Eole



Paysages éoliens virtuels

Ce projet cherche à comprendre et à reproduire les processus éoliens et les reliefs associés en fusionnant modélisations, simulations et visualisations.

Projet porté par Clément Narteau de l'équipe de dynamique des fluides géologiques.

Virtual wind landscapes

This project aims to understand and reproduce wind processes and the associated landforms by merging modeling, simulation and visualization.

Project led by Clément Narteau from the Geological Fluid Dynamics team.

Plum-BeatR



Pulsations courte-période du panache de La Réunion et rhéologie du manteau

Ce projet vise à mieux connaître les fluctuations du taux d'émission magmatique du point chaud Réunion afin de mieux comprendre les processus mantelliques à l'origine des panaches mantelliques.

Projet porté par Vincent Famin,
de l'équipe des systèmes volcaniques.

Short-period pulsations of the Réunion plume and mantle rheology

The aim of this project is to improve our knowledge of fluctuations in the magma emission rate from the Réunion hotspot in order to gain a better understanding of the mantle processes behind the mantle plumes.

Project led by Vincent Famin,
from the Volcanic Systems team.

Colossal

Contrôle par les colloïdes du devenir environnemental des oligo-éléments sensibles à l'oxydoréduction

Ce projet vise à différencier l'évolution lente des colloïdes, en réponse aux conditions bio/hydro/pédo/climatologiques, des réactions redox des contaminants que sont les éléments traces métalliques et métalloïdes (ETM ; ex : As, U, Cu, Cr), accélérés à la surface des colloïdes.

Projet porté par Rémi Marsac, de l'équipe de biogéochimie à l'Anthropocène des éléments et contaminants émergents.

Colloids control the environmental fate of redox-sensitive trace elements

This project aims to differentiate between the slow evolution of colloids, in response to bio/hydro/pedo/climatological conditions, and the redox reactions of contaminants such as trace metals and metalloids (TMEs; e.g. As, U, Cu, Cr), which are accelerated at the surface of colloids.

Project led by Rémi Marsac, from the Biogeochemistry at the Anthropocene of Elements and Emerging Contaminants team.

NanoAggreg



Etude in situ des processus d'hétéroagrégation de nanoparticules dans les eaux de surface

Ce projet vise à développer et à appliquer une méthode de quantification et de caractérisation simultanées des hétéroagrégats dans des conditions naturelles et à des concentrations réalistes, afin de fournir de nouvelles informations sur le devenir des nanoparticules dans les eaux naturelles, ce qui aidera à comprendre les cycles géochimiques et le devenir des polluants émergents.

Projet porté par Yann Sivry, de l'équipe de biogéochimie à l'Anthropocène des éléments et contaminants émergents.

In situ study of nanoparticle heteroaggregation processes in surface water

This project aims to develop and apply a method for the simultaneous quantification and characterization of heteroaggregates under natural conditions and at realistic concentrations. This will provide new insights into the fate of nanoparticles in natural waters, helping to understand geochemical cycles and the behavior of emerging pollutants.

Project led by Yann Sivry, from the Biogeochemistry at the Anthropocene of Elements and Emerging Contaminants team.

Dhyam

Diversité, dynamique et impact de l'activité hydrothermale ultramafique dans les dorsales médio-océaniques

Ce projet vise à étudier l'altération des roches mantoïques dans les dorsales océaniques, caractériser la diversité et la distribution des sites hydrothermaux, ainsi que leur lien avec les écosystèmes et le contexte géologique, en vue d'une intégration dans des modèles tectoniques globaux pour une meilleure évaluation des bilans chimiques.

Projet porté par Baptiste Debret
de l'équipe de géomicrobiologie.

Diversity, dynamics and impact of ultramafic-hosted hydrothermal activity at mid-ocean ridges

The aim of this project is to study the alteration of mantle rocks in ocean ridges, characterise the diversity and distribution of hydrothermal sites, and their link with ecosystems and the geological context, in order to integrate them into global tectonic models for a better assessment of chemical balances.

Project led by Baptiste Debret
from the Geomicrobiology team.

SmarTeeth



Fabrication additive intelligente de vitrocéramique à gradient fonctionnel pour des restaurations dentaires bio-inspirées.

L'objectif de ce projet est de développer une gamme de céramiques feldspathiques, pouvant être mises en forme en couches de faible épaisseur par technologie additive à faible impact environnemental, pour répondre à la problématique de restauration dentaire faiblement invasive et durable.

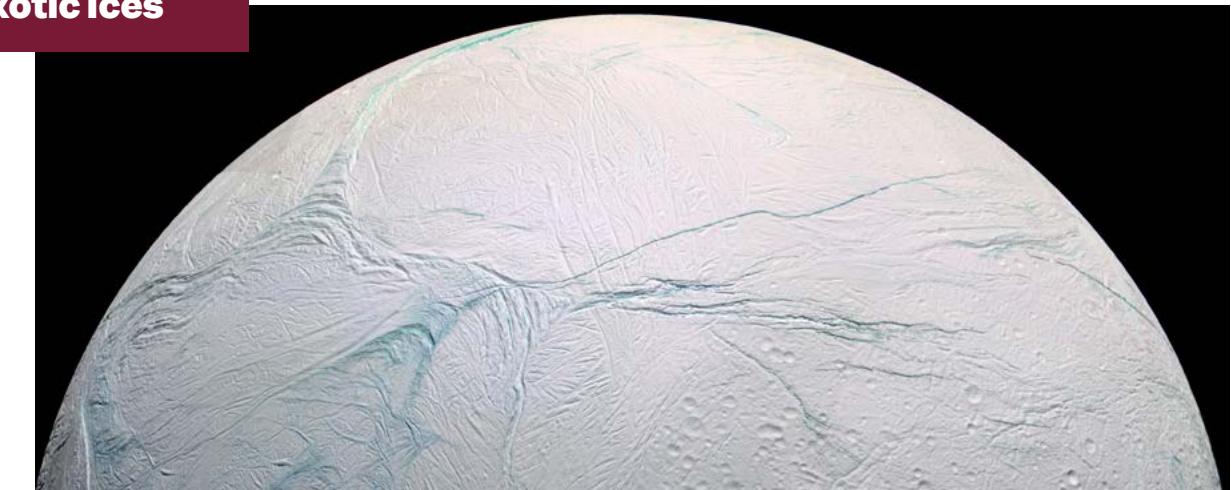
Projet porté par Daniel Neuville,
de l'équipe de géomatériaux.

Smart additive manufacturing of functional graded glass-ceramic for durable bio-inspired Teeth restorations.

The aim of this project is to develop a range of feldspathic ceramics that can be shaped in thin layers using additive technology with low environmental impact, in response to the problem of minimally invasive and durable dental restoration.

Project led by Daniel Neuville,
from the Geomaterials team.

Exotic Ices



Ce projet vise à mieux comprendre l'intérieur des corps glacés dans l'Univers en étudiant le comportement de molécules simples dans des conditions de pression et de température extrêmes.

Project porté par Razvan Caracas,
de l'équipe de cosmochimie, astrophysique
et géophysique expérimentale.

This project aims at enhancing our understanding of the interiors of ice bodies in the Universe by investigating the behavior of simple molecules under extreme pressure and temperature conditions.

Project led by Razvan Caracas,
from the Cosmochemistry, Astrophysics
and Experimental Geophysics team.

Roche



Ce projet a pour objectif de comprendre la formation et la dynamique des astéroïdes binaires et des anneaux autour des astéroïdes, ainsi que les anneaux et satellites autour des corps de la ceinture de Kuiper.

Project porté par Sébastien Charnoz,
de l'équipe de cosmochimie, astrophysique
et géophysique expérimentale.

The aim of this project is to understand the formation and dynamics of binary asteroids and rings around asteroids, as well as rings and satellites around Kuiper belt bodies.

Project led by Sébastien Charnoz,
from the Cosmochemistry, Astrophysics
and Experimental Geophysics team.

Retour sur le projet Interreg HATARI : les sources des aléas sismiques et volcaniques aux Comores

Back to the Interreg HATARI project: the sources of seismic and volcanic hazards in the Comoros

Du 5 au 12 juillet 2023 s'est déroulée la restitution des résultats du projet Interreg HATARI à Moroni, sur l'île de Grande Comore. Cette restitution s'est déroulée sous la forme d'ateliers et de conférences, en présence notamment des autorités comoriennes, des représentants de l'ambassade de France, de la Région Réunion, des institutions muséales de la zone océan Indien (La Réunion, Maurice, Madagascar et Seychelles) ainsi que de chercheurs comoriens et français.

Ce projet de recherche multidisciplinaire, mené de 2021 à 2023 et financé par le programme de coopération Interreg V Océan-Indien 2014-2020, avait pour objectif l'étude et le suivi des sources des aléas telluriques aux Comores, représentant une menace majeure pour la population. Il était dirigé par l'IPGP, en collaboration avec les principaux acteurs œuvrant dans ce domaine à l'échelle de l'océan Indien, notamment l'Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF-IPGP), l'Observatoire volcanologique du Karthala (OVK), le Musée National des Comores du Centre national de documentation et de recherche scientifique (CNDRS), l'Université de La Réunion, ainsi que la Cité du Volcan de La Réunion. Une dizaine de publications scientifiques découlant des travaux menés dans le cadre de ce projet ont été publiées dans des revues internationales.

Accroissement du réseau d'observation et de surveillance de l'archipel des Comores

Trois stations sismologiques à large bande, trois stations GNSS et une station géochimique pour surveiller les émissions de CO₂ ont été installées sur le volcan Karthala, situé sur l'île de Grande Comore, ainsi

From July 5th to 12th, 2023, the results of the Interreg HATARI project were presented in Moroni, on the island of Grande Comore. This presentation took the form of workshops and conferences, attended by Comorian authorities, representatives from the French embassy, the Reunion Region, museum institutions from the Indian Ocean region (Reunion, Mauritius, Madagascar and Seychelles), as well as Comorian and French researchers.

This multidisciplinary research project, conducted from 2021 to 2023 and funded by the Interreg V Indian Ocean Cooperation Program 2014-2020, aimed to study and monitor the sources of seismic hazards in the Comoros, which pose a major threat to the population. Led by the IPGP, in collaboration with key stakeholders in the Indian Ocean region, including the Volcanological Observatory of Piton de la Fournaise (OVPF-IPGP), the Karthala Volcanological Observatory (OVK), the National Museum of Comoros of the National Center for Documentation and Scientific Research (CNDRS), the University of Reunion, and the Reunion Volcano Center. About ten scientific publications resulting from the work conducted under this project have been published in international journals.

Expansion of the observation and monitoring network in the Comoros archipelago

Three broadband seismological stations, three GNSS stations, and one geochemical station for monitoring CO₂ emissions were installed on the Karthala volcano, located on the island of Grande Comore,

que sur les îles d'Anjouan et de Mohéli. Sur Grande Comore, ces installations ont renforcé le réseau géophysique de surveillance du volcan le plus actif de l'archipel, tandis que les stations à Mohéli et à Anjouan permettront, pour la première fois, un suivi plus précis de l'activité sismique et tectonique à l'échelle de l'ensemble de l'archipel.

Les structures des stations, conçues et fabriquées à l'OVPF-IPGP, ont été transportées par bateau jusqu'aux Comores, où l'installation a été finalisée par l'équipe du CNDRS, avec le soutien de l'armée des Comores, de la Protection Civile et du Programme des Nations unies pour le développement. Ce nouveau modèle de stations, comprenant des capteurs et des systèmes d'acquisition logés dans des caissons métalliques fixés sur des dalles en béton armé, a été spécialement conçu pour minimiser les risques de dommages et de vandalisme lors de leur déploiement en milieu naturel.

as well as on the islands of Anjouan and Moheli. On Grande Comore, these installations strengthened the geophysical monitoring network of the archipelago's most active volcano, while the stations on Moheli and Anjouan will allow, for the first time, a more precise monitoring of seismic and tectonic activity across the entire archipelago.

The station structures, designed and manufactured at the OVPF-IPGP, were transported by boat to the Comoros, where installation was completed by the team from the CNDRS, with the support of the Comorian army, the Civil Protection, and the United Nations Development Program. This new model of stations, including sensors and acquisition systems housed in metal casings fixed on reinforced concrete slabs, was specifically designed to minimize the risks of damage and vandalism during deployment in natural environments.



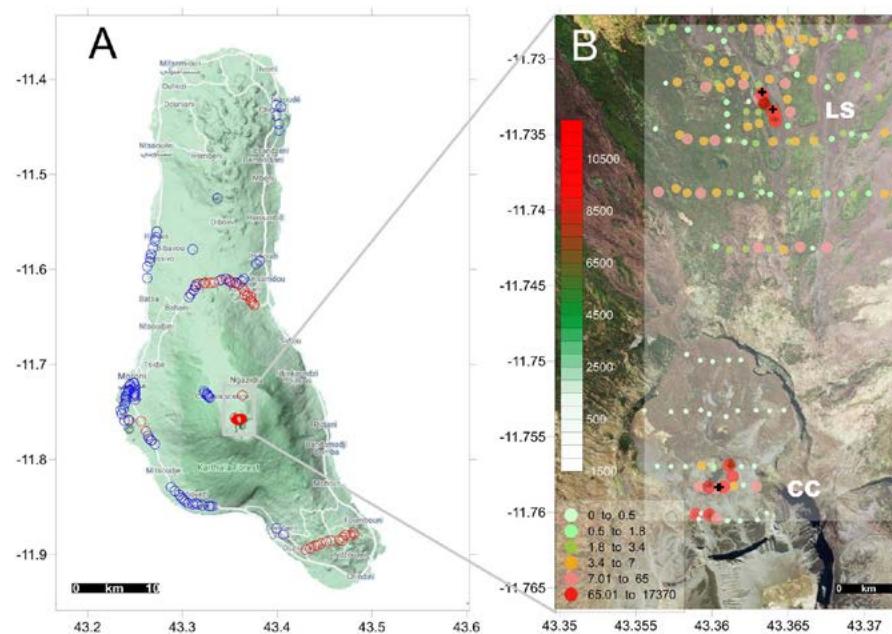
Installation d'une nouvelle station multiparamètres (sismologique, géodésique et géochimique) au sommet du volcan Karthala par l'équipe de l'OVK.
Installation of a new multiparameter station (seismological, geodetic and geochemical) on the summit of the Karthala volcano by the OVK team.

Contribution au suivi de l'activité du volcan Karthala

Le développement des réseaux d'observation et d'analyse des données a été d'une aide précieuse pour l'OVK pour détecter et caractériser le regain d'activité du Karthala entre novembre 2021 et juillet 2022. Ce réveil s'est manifesté par une activité sismique et des déplacements du sol liés à une intrusion magmatique sur le flanc ouest du volcan, qui s'est arrêtée en profondeur.

Une meilleure connaissance de l'origine, de l'âge et de l'aléa volcanique de la zone

Les études de terrain réalisées par l'Université de La Réunion ont permis de mieux comprendre la chronologie éruptive sur les îles comoriennes et leur relation avec la distribution des failles sur le territoire. Les études menées en parallèles du projet HATARI ont révélé une activité volcanique Holocène (de - 12 000 ans à aujourd'hui) sur les îles d'Anjouan et de Mohéli (Quidelleur *et al.*, 2022 et Rusquet *et al.*, 2023), qui peuvent donc être considérées comme volcaniquement actives. Dans ce cadre temporel, l'installation de stations sismiques et GNSS sur ces îles prend tout son sens.



Contribution to monitoring the activity of the Karthala volcano

The establishment of observation and data analysis networks has been instrumental in aiding OVK in detecting and characterizing the resurgence of activity at Karthala between November 2021 and July 2022. This resurgence was marked by seismic activity and ground displacements associated with a magmatic intrusion on the western flank of the volcano, which ceased at depth.

A better understanding of the origin, age and volcanic hazard of the area

Field studies conducted by the University of Reunion have contributed to a better understanding of the eruption chronology on the Comorian islands and their correlation with fault distribution in the region. Simultaneous studies conducted alongside the HATARI project have revealed Holocene volcanic activity (from 12,000 years ago to the present day) on the islands of Anjouan and Mohéli (Quidelleur *et al.*, 2022 and Rusquet *et al.*, 2023), indicating their volcanic activity. Within this timeframe, the deployment of seismic and GNSS stations on these islands is highly justified.

D'autres mesures sur le terrain ainsi que des analyses chimiques et isotopiques en laboratoire ont permis pour la première fois :

- une identification et une caractérisation complète des émissions de fluides à la fois sur les flancs du volcan Karthala et à son sommet (Liuzzo *et al.*, 2021).
- une reconstruction fine de la morphologie volcanique en Grande Comore, afin de mieux comprendre les zones les plus actives de ces volcans et la nature des magmas émis, et de mettre en évidence la variabilité des styles éruptifs (effusifs et explosifs) produits par le volcan (thèse de F. Lötter débutée en 2022).

Renforcement du partenariat entre l'IPGP et le CNDRS

Le projet HATARI a également permis de structurer et consolider le cadre de la collaboration entre l'IPGP et le CNDRS, à travers la signature d'une convention cadre de coopération entre les deux organismes, la formation des agents de l'OVK-CNDRS à l'OVPF-IPGP ou encore des actions conjointes de communication sur les risques telluriques aux Comores et à La Réunion au sein de lycées, collèges ou via des conférences grand public.

Furthermore, through field measurements and chemical and isotopic analyses in the laboratory, it has been possible for the first time to:

Fully identify and characterize fluid emissions on the flanks and summit of Karthala volcano (Liuzzo *et al.*, 2021).

Reconstruct volcanic morphology in Grande Comore comprehensively. This has provided insights into the most active zones of these volcanoes, the nature of emitted magmas, and has highlighted the variability of eruptive styles (effusive and explosive) produced by the volcano (PhD of F. Lötter beginning in 2022).

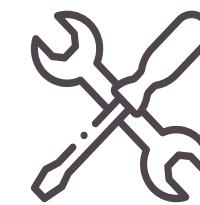
Strengthening the partnership between the IPGP and the CNDRS

The HATARI project has also helped to structure and consolidate the framework for collaboration between the IPGP and the CNDRS, through the signing of a framework cooperation agreement between the two organizations, the training of OVK-CNDRS agents at the OVPF-IPGP and joint communication initiatives on telluric risks in the Comoros and La Réunion within high and middle schools and via conferences for the general public.

En savoir plus / Read more:

- X. Quidelleur, L. Michon, V. Famin, M.-C. Geffray, M. Danišk, N. Gardiner, A. Rusquet & M. G. Zakaria, **Holocene volcanic activity in Anjouan Island (Comoros archipelago) revealed by new Cassignol-Gillot groundmass K-Ar and ¹⁴C ages**, *Quaternary Geochronology*, Vol. 67, 2022, 101236, DOI : 10.1016/j.quageo.2021.101236.
- M. Liuzzo, A. Di Muro, A. L. Rizzo, A. Caracausi, F. Grassi, N. Fournier, *et al.* (2021). **Gas geochemistry at Grande Comore and Mayotte volcanic islands (Comoros archipelago), Indian Ocean**. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e2021GC009870, DOI : 10.1029/2021GC009870.
- A. Rusquet, V. Famin, X. Quidelleur, L. Michon, F. Nauret, M. Danišk, I. Thimon, S. Leroy & A. Lemoine, **Pliocene-to-Holocene volcano-tectonic activity on Mohéli Island (Comoros archipelago) constrained by new K-Ar ages**, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 442, 2023, 107896, DOI : 10.1016/j.jvolgeores.2023.107896.

Contact : peltier@ipgp.fr



Nouveaux instruments
New instruments

Une station sismologique et géodésique sous-marine temps réel

A real-time underwater seismological and geodetic station

À la différence des stations de surveillance sismologiques et géodésiques situées sur la terre ferme, les stations sous-marines demeurent dans l'incapacité de transmettre en temps-réel les données qu'elles ont acquises. Afin de faire face à cette problématique à la fois technologique, logistique et financière, deux possibilités s'offrent aux scientifiques actuellement : installer un observatoire sous-marin câblé ou déployer des bouées de surface afin d'alimenter les stations et de transmettre leurs données à un centre opérationnel à terre.

La mise en place de telles infrastructures sous-marines nécessitant plusieurs années, celles-ci ne permettent pas d'apporter une réponse rapide lors d'une crise sismique ou volcanique sous-marine, telle que celle débutée à Mayotte en mai 2018. C'est la raison pour laquelle la communauté scientifique française avait déployé alors des stations autonomes, régulièrement relevées lors de campagnes océanographiques. Toutefois, un délai de traitement des données pour affiner les résultats issus des stations terrestres s'avérait nécessaire, retardant de trois à six mois le rendu de l'expertise finale aux autorités.

Pour remédier à ce problème majeur, les équipes des observatoires volcanologiques et du parc des stations sous-marines de l'IPGP ont noué un partenariat avec l'entreprise OSEAN, dans le but de développer trois stations sous-marines équipées d'un hydrophone, de capteurs sismiques, géodésiques, accélérométriques, thermiques et surtout de moyens de communication acoustique capables de télécharger une dizaine d'événements sismiques, ainsi que l'ensemble des données géodésiques de manière quotidienne. Réalisé dans un premier temps depuis un bateau en surface, le téléchargement de ces données sera par la suite automatisé à travers l'utilisation d'un véhicule autonome sous-marin.

Alimentées par des piles au lithium, ces stations autonomes doivent relever un double défi technologique : la maîtrise du temps et de leur consommation énergétique. En effet, la localisation des événements sismiques requiert un horodatage des données d'une précision absolue, de l'ordre de quelques millisecondes, ce que

Unlike seismological and geodetic monitoring stations on land, underwater stations are unable to transmit the data they have acquired in real time. Scientists currently have two options for dealing with this technological, logistical and financial problem: installing a cabled underwater observatory or deploying surface buoys to power the stations and transmit their data to an operational centre on land.

As it takes several years to set up such underwater infrastructures, they cannot provide a rapid response in the event of an underwater seismic or volcanic crisis, such as the one that began in May 2018 in Mayotte. This is why the French scientific community deployed autonomous stations at the time, which were regularly surveyed during oceanographic campaigns. However, it took some time to process the data and refine the results from the land stations, delaying the final report to the authorities by three to six months.

To solve this major problem, the IPGP's volcanological observatories and underwater stations teams have entered into a partnership with the OSEAN company, with the aim of developing three underwater stations equipped with a hydrophone, seismic, geodetic, accelerometric and thermal sensors and, above all, acoustic communication systems capable of downloading around ten seismic events and all the geodetic data on a daily basis. Initially carried out from a boat on the surface, the downloading of this data will subsequently be automated using an autonomous underwater vehicle.

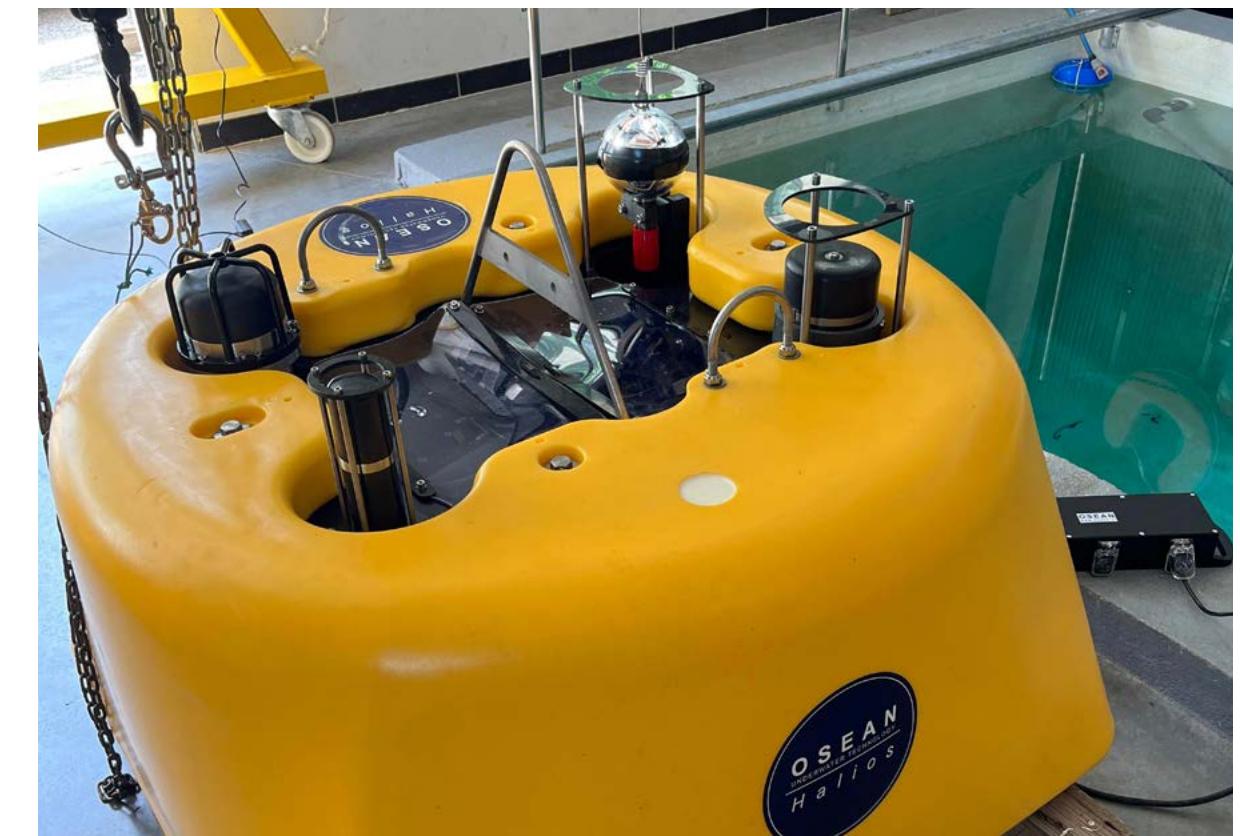
Powered by lithium batteries, these autonomous stations face a dual technological challenge: controlling time and energy consumption. Locating seismic events requires data to be time-stamped with absolute precision, to the order of a few milliseconds, which is not possible with the

ne permettent pas les horloges embarquées dans les stations sous-marines actuelles, dont la dérive est d'environ une seconde par an. Ainsi, l'horloge atomique des stations développées garantit une dérive de dix millisecondes par an, tout en proposant une autonomie de 460 jours si aucune communication acoustique n'est mise en œuvre. En cas de téléchargement pouvant aller jusqu'à 1800 événements sismiques, leur autonomie est alors réduite à six mois.

Outre leur fonctionnement en mode autonome, ces nouvelles stations seront bientôt déployées au sein de l'observatoire sous-marin câblé de Mayotte. Leur connectivité et leur serveur de données assureront une surveillance en temps réel, de la même manière que les stations à terre, la dérive long terme sur plusieurs années de l'horloge atomique étant compensée par l'utilisation d'un protocole de précision pour synchroniser les horloges sous-marines avec des horloges terrestres interconnectées sur un réseau Ethernet. Après plus d'un an d'essai en laboratoire et en mer Méditerranée, le premier déploiement des trois stations est prévu en juillet 2024 à Mayotte.

clocks on board current underwater stations, which drift by around one second a year. The atomic clock of the stations developed guarantees a drift of ten milliseconds per year, while offering an autonomy of 460 days if no acoustic communication is used. If up to 1,800 seismic events are downloaded, their autonomy is reduced to six months.

As well as operating in autonomous mode, these new stations will soon be deployed within the Mayotte cabled underwater observatory. Their connectivity and data server will ensure real-time monitoring, in the same way as the land-based stations, with the long-term drift over several years of the atomic clock being compensated for by the use of a precision protocol to synchronise the underwater clocks with land-based clocks interconnected on an Ethernet network. After more than a year of testing in the laboratory and in the Mediterranean Sea, the first deployment of the three stations is scheduled for July 2024 in Mayotte.



Contact : arnaudl@ipgp.fr

PEPR: l'IPGP s'engage dans trois programmes phares PEPR: the IPGP is involved in three major programmes

L'IPGP est impliqué dans plusieurs programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR), lesquels visent à accompagner une transformation technologique, économique, sociétale, sanitaire ou environnementale considérée comme prioritaire au niveau national ou européen.

Déclinés en deux types différents, ces programmes peuvent financer une transformation déjà engagée, on parle alors de "PEPR adossés aux stratégies nationales d'accélération", ou accompagner une transformation qui commence à émerger, les "PEPR exploratoires".

Ainsi, l'IPGP est engagé dans un PEPR de stratégie nationale via le programme "Grands fonds marins" et deux PEPR exploratoires à travers les programmes "Risques (IRiMa)" et "Origines : des planètes à la vie".



Entretien avec Mathilde Cannat, de l'équipe de géosciences marines à l'IPGP, au sujet du PEPR Grands fonds marins Interview with Mathilde Cannat, from the Marine Geosciences team at the IPGP, on the PEPR Deep Sea

En quoi consiste le PEPR "Grands fonds marins" ?

Ce programme, co-piloté par l'Ifremer, le CNRS et l'IRD, débutera au printemps, avec un budget de 50 millions d'euros sur neuf ans. Son objectif est d'acquérir des connaissances pour établir des usages durables et une protection des grands fonds marins, comprenant la colonne d'eau et le substratum rocheux des domaines marins de plus de 200 mètres de profondeur. Ces zones, situées au-delà de la zone photique où la photosynthèse peut se produire, jouent un rôle crucial dans les équilibres chimiques et la biodiversité planétaire. L'interdépendance des trois domaines - Terre solide, colonne d'eau et biosphère - émerge comme le cadre de recherche pertinent pour comprendre la diversité et le fonctionnement de ces milieux, ainsi que pour les protéger contre les impacts humains.

The IPGP is involved in several priority research programmes and facilities (PEPR), which aim to support a technological, economic, societal, health or environmental transformation considered to be a priority at national or European level.

These programmes are of two different types: they can finance a transformation that has already begun, known as "PEPRs backed by national acceleration strategies", or they can support a transformation that is just beginning to emerge, known as "exploratory PEPRs".

The IPGP is involved in one national strategy PEPR via the "Deep sea" programme and two exploratory PEPRs via the "Risks (IRiMa)" and "Origins: from planets to life" programmes.

Un autre objectif est d'étudier les représentations que nos sociétés ont des grands fonds marins. Ces représentations, partagées par le grand public, les chercheurs et les décideurs, influencent les mesures législatives et les accords internationaux, ainsi que les pratiques scientifiques, artistiques et commerciales. Une recherche fondamentale en sciences humaines et sociales examinera nos connaissances, nos capacités d'action, nos droits, nos devoirs et nos responsabilités à l'égard de ces milieux autrefois considérés comme inaccessibles. Ces travaux, impliquant des acteurs non-académiques, seront menés en étroite collaboration avec les recherches en sciences de la vie et de la Terre.

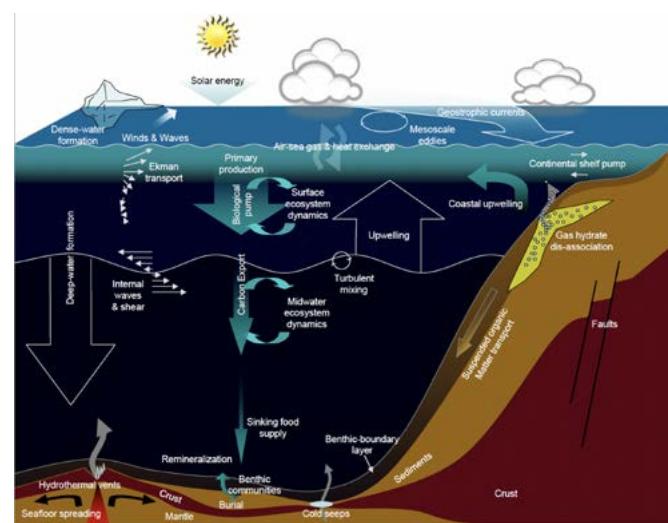
Quel est votre rôle et l'implication de l'IPGP dans ce programme ?

Depuis la conception du projet, j'ai été co-responsable de ce PEPR pour le CNRS, mais je me prépare à passer le relais à une collègue géochimiste de Toulouse. Il est évident que plusieurs sujets abordés par les équipes de l'IPGP dans le domaine marin, tels que les sources hydrothermales, les systèmes volcaniques, le rôle des micro-organismes, ainsi que les flux chimiques liés au cycle de la lithosphère océanique et leur impact sur la colonne d'eau, sont destinés à être intégrés dans des projets soutenus par l'ANR ou à bénéficier de financements de thèses dans le cadre de ce PEPR. Les détails concernant la phase initiale de co-construction (questionnaires, ateliers, etc.) seront diffusés dès le lancement officiel du PEPR ce printemps, et j'espère que de nombreux collègues de l'IPGP pourront y participer.

Another objective is to study the representations that our societies have of the deep-sea environments. These representations, shared by the general public, researchers, and decision-makers, influence legislative measures and international agreements, as well as scientific, artistic, and commercial practices. Fundamental research in humanities and social sciences will examine our knowledge, our capacities for action, our rights, duties, and responsibilities towards these once-considered inaccessible environments. These works, involving non-academic actors, will be conducted in close collaboration with research in life and Earth sciences.

What is your role and the IPGP's involvement in this programme?

Since the inception of the project, I have been co-leading this PEPR for the CNRS, but I am preparing to hand over the reins to a geochemist colleague from Toulouse. It is clear that several topics addressed by IPGP teams in the marine domain, such as hydrothermal vents, volcanic systems, the role of micro-organisms, and chemical fluxes related to the oceanic lithosphere cycle and their impact on the water column, are intended to be integrated into projects supported by the ANR or to benefit from PhD funding within the framework of this PEPR. Details regarding the initial co-construction phase (questionnaires, workshops, etc.) will be disseminated upon the official launch of the PEPR this spring, and I hope that many IPGP colleagues will be able to participate.



Contact : cannat@ipgp.fr



Entretien avec Anne Le Friant, de l'équipe des systèmes volcaniques à l'IPGP, au sujet du PEPR Risques

Interview with Anne Le Friant,
from the Volcanic Systems team
at the IPGP, about PEPR Risks

En quoi consiste le PEPR "Risques (IRiMa)"?

Le PEPR Risques (IRiMa - Gestion intégrée des risques pour des sociétés plus résilientes à l'ère des changements globaux) œuvre à l'élaboration d'une nouvelle stratégie de gestion des risques, des catastrophes et de leurs impacts, dans un contexte marqué par la multiplication des changements climatiques, anthropiques et globaux. Adoptant une approche holistique et intégrative des connaissances, il rassemble les disciplines des géosciences, des sciences du climat et de l'environnement, de l'ingénierie, des sciences des données et du numérique, ainsi que des sciences humaines et sociales. Ce programme se structure autour de six thèmes :

- Science et société (risques, résilience et développement de stratégies d'adaptation)
- Données, modèles quantitatifs et algorithmes pour l'analyse des risques et un soutien à la prise de décision
- Risques en montagne et risques côtiers
- Risques en zones urbanisées et en zones industrielles
- Risques en Outre-mer et dans les zones intertropicales
- Infrastructures et plateformes

Quel est votre rôle et l'implication de l'IPGP dans ce programme ?

Marc Chaussidon, directeur de l'IPGP, siège au comité de pilotage. Je coordonne l'axe 5 et je suis également responsable du projet ciblé ROM (Risques Outre-Mer : 2,5 M€) portant sur les risques telluriques et hydro-météorologiques intenses et fréquents auxquels sont confrontées les populations des territoires d'outre-mer et des zones intertropicales.

What is the PEPR "Risks (IRiMa)"?

The PEPR Risks (IRiMa - Integrated Risk Management for more resilient societies in the era of global changes) works towards developing a new strategy for risk and disaster management, within a context marked by the increasing occurrence of climate, anthropogenic, and global changes. Embracing a holistic and integrative approach to knowledge, it brings together disciplines such as geosciences, climate and environmental sciences, engineering, data sciences and digital technologies, as well as humanities and social sciences. This program is structured around six themes:

- Science and society (risks, resilience, and development of adaptation strategies)
- Data, quantitative models, and algorithms for risk analysis and decision support
- Mountain risks and coastal risks
- Risks in urban and industrial areas
- Overseas risks and risks in intertropical zones
- Infrastructure and platforms

What is your role and the IPGP's involvement in this programme?

Marc Chaussidon, director of the IPGP, sits on the steering committee. I coordinate Axis 5 and I am also in charge of the targeted ROM project (Overseas Risks: €2.5 million) focusing on intense and frequent geological and hydrometeorological risks faced by populations in overseas territories and intertropical zones.



Ce projet est structuré autour de trois axes : le premier axe vise à développer une instrumentation innovante pour le forage en Martinique (phase de réactivation depuis quelques années) afin de faire face aux risques sismiques et volcaniques. Le deuxième axe se concentre sur l'estimation des dommages et des impacts socio-économiques liés au risque de tsunamis en appliquant certaines méthodologies à Mayotte, dans l'Océan indien. Enfin, le troisième axe s'intéresse aux risques hydro-climatiques dans le Pacifique, à la gestion des crises cycloniques en Nouvelle-Calédonie et à l'adaptation des îles coraliennes aux effets du changement climatique en Polynésie française (érosion côtière).

This project is structured around three axes: the first axis aims to develop innovative drilling instrumentation in Martinique (reactivation phase for several years) to address seismic and volcanic risks. The second axis focuses on estimating damages and socio-economic impacts related to tsunami risk by applying certain methodologies in Mayotte, in the Indian Ocean. Finally, the third axis addresses hydro-climatic risks in the Pacific, cyclone crisis management in New Caledonia, and the adaptation of coral islands to the effects of climate change in French Polynesia (coastal erosion).

Contact : lefriant@ipgp.fr



Entretien avec Guillaume Avice, de l'équipe de cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale (CAGE) à l'IPGP, au sujet du PEPR Origines

Interview with Guillaume Avice,
from the Cosmochemistry, Astrophysics
and Experimental Geophysics (CAGE)
team at the IPGP, about PEPR Origins

En quoi consiste le PEPR "Origines : des planètes à la vie" ?

L'objectif est de mieux comprendre le processus de formation des planètes terrestres, tant solaires qu'extrasolaires, ainsi que les conditions favorables à l'émergence de la vie. Lancé à la fin de 2023, ce projet est coordonné par le CNRS (avec 30 partenaires académiques institutionnels et la participation de 140 chercheurs) et bénéficie d'un budget de 46 millions d'euros sur une période de sept ans. Il s'articule autour de cinq axes de recherche, pour lesquels 17 projets spécifiques ont déjà été sélectionnés. L'un de ces axes se concentre sur l'analyse d'échantillons terrestres et extraterrestres, incluant le développement de techniques novatrices de caractérisation et de préservation d'échantillons inconnus. Un autre axe concerne des domaines scientifiques dans lesquels l'IPGP est particulièrement actif, visant à déployer une flotte de bouées sismiques sous-marines autonomes pour collecter des données de sismologie globale. Par ailleurs, ce PEPR soutient des initiatives d'animation et de médiation scientifique à destination de la communauté scientifique et du grand public.

Quel est votre rôle et l'implication de l'IPGP dans ce programme ?

L'IPGP est directement impliqué dans les deux axes de recherche mentionnés précédemment. J'ai contribué à la conception et à l'organisation de l'axe portant sur l'analyse de la matière terrestre et extra-terrestre avant la sélection finale du PEPR Origins.

What is the PEPR "Origins: from planets to life"?

The objective is to better understand the process of formation of terrestrial planets, both solar and extra-solar, as well as the conditions conducive to the emergence of life. Launched at the end of 2023, this project is coordinated by the CNRS (with 30 institutional academic partners and the participation of 140 researchers) and has a budget of 46 million euros over a period of seven years. It revolves around five research axes, for which 17 specific projects have already been selected. One of these axes focuses on the analysis of terrestrial and extra-terrestrial samples, including the development of innovative techniques for characterizing and preserving unknown samples. Another axis concerns scientific domains in which the IPGP is particularly active, aiming to deploy a fleet of autonomous underwater seismic buoys to collect global seismology data. Furthermore, this PEPR supports initiatives for science outreach and public engagement aimed at both the scientific community and the general public.

What is your role and the IPGP's involvement in this program?

The IPGP is directly involved in the two research axes mentioned earlier. I contributed to the design and organization of the axis focusing on the analysis of terrestrial and extra-terrestrial matter before the final selection of the PEPR Origins.



De plus, un projet a été récemment sélectionné en janvier 2024, dirigé conjointement par Julien Siebert de l'équipe CAGE. Ce projet vise à caractériser de manière approfondie des échantillons expérimentaux reproduisant les conditions de formation du noyau terrestre, en utilisant une nouvelle sonde atomique développée dans le cadre du PEPR. Pour ma part, je suis co-responsable du projet MARCUS (4 millions d'euros), qui a pour objectif de mettre au point de nouvelles techniques de préservation d'échantillons inconnus, notamment ceux rapportés sur Terre par les missions spatiales de retour d'échantillons de corps extraterrestres.

Additionally, a project was recently selected in January 2024, co-led by Julien Siebert from the CAGE team. This project aims to thoroughly characterize experimental samples reproducing the conditions of Earth's core formation, using a new atomic probe developed within the framework of the PEPR. As for me, I am co-responsible for the MARCUS project (4 million euros), which aims to develop new techniques for preserving unknown samples, including those brought back to Earth by space missions returning samples from extra-terrestrial bodies.

En savoir plus / Read more:

<https://pepr-origins.fr>

Contact : avice@ipgp.fr

Prix et distinctions

Awards and honours

**Mathilde Cannat**

Géosciences marines
Marine Geosciences



Médaille Arthur Holmes
de l'EGU
EGU Arthur Holmes Medal

**Isabelle Panet**

Géodésie
Geodesy



Grand Prix scientifique de
la Fondation Simone et
Cino Del Duca
Scientific Grand Prize of the
Simone and Cino Del Duca
Foundation

**Kristel Chanard**

Géodésie
Geodesy



Prix "John Wahr Early
Career" de l'AGU
AGU John Wahr Early
Career Award

**Yann Klinger**

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



Médaille Stephan Mueller
de l'EGU
EGU Stephan Mueller
Medal

**Charlotte Dejean**

LOMS3
LOMS3



Lauréate 2023 du concours
innovation i-PhD de Bpifrance
Prix Zeugma 2023 des PÉPITE
Île-de-France
Winner of the 2023 Bpifrance
i-PhD innovation competition
Zeugma 2023 Prize from
PÉPITE Île-de-France

**Edith Kubik**

Prix de thèse de la CNFGG
CNFGG PhD Award



**Equipe InSight**

Planétologie et sciences spatiales
Planetology and Space Sciences



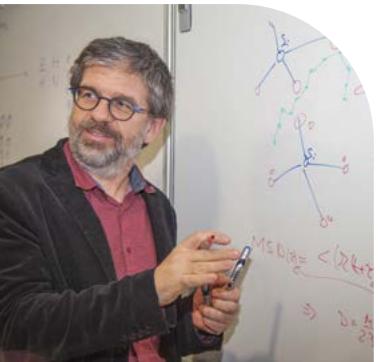
Prix Newcomb Cleveland de l'American Association of Advancement of Sciences (AAAS)
Newcomb Cleveland Award from the American Association of Advancement of Sciences (AAAS)

**Sébastien Charnoz**

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



Prix Ciel & Espace du livre d'astronomie pour "Les Mondes de Saturne"
Ciel & Espace astronomy book prize for "Les Mondes de Saturne"

**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



Nouveaux chercheurs et enseignants-chercheurs

New researchers and professors

**Bhavani Bénard**

Bhavani Bénard débute sa carrière au sein du Laboratoire GéoSciences Réunion (LGSR, Université de La Réunion - IPGP) où elle effectue une thèse en collaboration avec le BRGM de 2017 à 2020, puis un postdoctorat de 2020 à 2021, sur la chimie des systèmes hydrothermaux réunionnais dans le cadre de projets d'exploration géothermique. Elle continue ensuite en tant que chercheuse postdoctorale à l'OVPF-IPGP, puis au sein de l'équipe de Géochimie des isotopes stables à l'IPGP, où elle étudie les dégazages magmatiques des volcans de l'océan Indien, à La Réunion, à Mayotte et aux Comores. En 2023, elle est recrutée en tant que Maître de conférences au LGSR. Ses recherches portent sur l'étude des processus magmatiques et leur influence sur la zone critique à travers l'analyse chimique des gaz et des eaux. Elle intervient notamment pour le REVOSIMA et l'Observatoire de la Zone Critique de La Réunion (OZCAR, OSU-R).



Équipe Team: Systèmes volcaniques
Volcanic Systems

Thème Theme: Risques naturels
Natural Hazards

Statut Position: Maître de conférences
Lecturer

Contact: benard@ipgp.fr

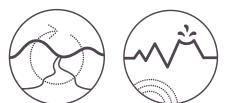
Bhavani Bénard started her career at the Laboratoire GéoSciences Réunion (LGSR, Université de La Réunion - IPGP), where she obtained her PhD in collaboration with the BRGM from 2017 to 2020, followed by a post-doctoral position from 2020 to 2021 on the chemistry of Réunion's hydrothermal systems in the context of geothermal exploration projects. She then continued as a post-doctoral researcher at the OVPF-IPGP, then within the Stable Isotope Geochemistry team at the IPGP, where she studied magmatic degassing of volcanoes in the Indian Ocean, in Réunion, Mayotte and the Comoros. In 2023, she was recruited as a lecturer at the LGSR. Her research focuses on the study of magmatic processes and their influence on the critical zone through the chemical analysis of gases and water. In particular, she works for the REVOSIMA and the Observatoire de la Zone Critique de La Réunion (OZCAR, OSU-R).





Manon Dalaison

Manon Dalaison obtient son doctorat au sein du laboratoire de géologie de l'École Normale Supérieure en 2021, avec une thèse portant sur la mesure du glissement le long des failles par interférométrie radar, notamment à la frontière de plaques tectoniques en Afghanistan et au Pakistan. Elle poursuit ensuite ses recherches au Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) dans une équipe de télédétection, pour étudier en particulier les biais et erreurs dans les mesures de déformation par satellite. En 2023, elle est recrutée à l'IPGP en tant que maître de conférences où elle rejoint l'équipe de géodésie. Ses recherches se concentrent sur l'analyse d'images satellites radar pour mesurer les mouvements du sol en réponse aux variations des stocks d'eau souterraine au fil des saisons, des prélèvements anthropiques et des événements climatiques. L'objectif est de mieux comprendre l'évolution des ressources en eau et le risque sismique associé à la surexploitation des aquifères.



Équipe Team: Géodésie
Geodesy

Thèmes Themes: Risques naturels et Système Terre
Natural Hazards and Earth System Science

Statut Position: Maître de conférences
Lecturer

Contact: dalaison@ipgp.fr

Manon Dalaison obtained her PhD from the geology laboratory of the École Normale Supérieure in 2021, focusing on slip measurement along faults using radar interferometry, with a particular emphasis on the tectonic plate boundary in Afghanistan and Pakistan. She then continued her research at the Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) in a remote sensing team, where she studied biases and errors in satellite deformation measurements. In 2023, she was appointed as a lecturer at the IPGP, joining the geodesy team. Her research revolves around analyzing radar satellite imagery to quantify ground movements in response to fluctuations in groundwater levels across seasons, anthropogenic water withdrawals, and climatic events. The overarching goal is to enhance our understanding of changes in water resources and the seismic risk associated with aquifer overexploitation.



Mark Wieczorek

Mark Wieczorek obtient son doctorat en géophysique planétaire en 1999 à la Washington University in St. Louis. Après un postdoctorat au Massachusetts Institute of Technology (MIT), il rejoint l'IPGP en 2002, au sein de l'équipe de Planétologie et sciences spatiales. De 2011 à 2015, il est rédacteur en chef du *Journal of Geophysical Research: Planets*. Il travaille ensuite de 2017 à 2022 au laboratoire J.-L. Lagrange (Observatoire de la Côte d'Azur), puis retourne à l'IPGP où il devient directeur de recherche CNRS. Il utilise les données topographiques, gravimétriques et magnétiques des planètes telluriques et de leurs lunes pour comprendre leur structure interne et leur évolution thermique. Il participe à de nombreuses missions spatiales, passées, présentes et futures, telles que GRAIL (Lune), InSight (Mars), Psyché (astéroïde Psyché), Lunar Vertex (Lune), BepiColombo (Mercure) et JUICE (lunes de Jupiter).



Équipe Team: Planétologie et sciences spatiales
Planetology and Space Sciences

Thèmes Themes: Intérieurs de la Terre et des planètes et Origines
Earth and Planetary Interiors and Origins

Statut Position: Directeur de recherche CNRS
CNRS Research Director
Contact: mark.wieczorek@ipgp.fr

Mark Wieczorek obtained his PhD in planetary geophysics from Washington University in St. Louis in 1999. Following a postdoctoral position at the Massachusetts Institute of Technology (MIT), he joined the IPGP in 2002, working with the Planetology and Space Sciences team. From 2011 to 2015, he served as Editor-in-Chief of the *Journal of Geophysical Research: Planets*. Subsequently, he worked at the J.-L. Lagrange laboratory (Observatoire de la Côte d'Azur) from 2017 to 2022 before returning to the IPGP, where he assumed the role of CNRS Research Director. He uses topographic, gravimetric, and magnetic data from terrestrial planets and their moons to understand their internal structure and thermal evolution. He is actively involved in various past, ongoing, and forthcoming space missions, including GRAIL (Moon), InSight (Mars), Psyché (asteroid Psyché), Lunar Vertex (Moon), BepiColombo (Mercury), and JUICE (moons of Jupiter).



Rafael ABREU

Rafael Abreu obtient son doctorat en 2014 à l'université de Grenade, en Espagne, dans le domaine de la sismologie computationnelle. Après un postdoctorat effectué à l'université de Münster, en Allemagne, il rejoint l'IPGP au sein de l'équipe de Sismologie en 2022. Ses travaux combinent la physique théorique, les outils informatiques et les nouvelles observations sismologiques pour mieux comprendre l'intérieur profond de la Terre.



Observatoire Observatory: OVSG-IPGP

Équipe Team: Sismologie

Seismology

Thème Theme: Intérieurs de la Terre et des planètes

Earth and planetary interiors

Statut Position: Chargé de recherche CNRS

CNRS Research Fellow

Contact: rabreu@ipgp.fr



Rémi Marsac

Après avoir suivi un cursus en chimie, Rémi Marsac obtient son doctorat en sciences de la Terre en 2011 à Géosciences Rennes (Université de Rennes). Par la suite, il rejoint l'Institut sur le stockage des déchets nucléaires de Karlsruhe en Allemagne, où il travaille jusqu'en 2015. Il effectue ensuite un deuxième postdoctorat à l'École Nationale Supérieure de Chimie de Rennes puis est recruté en 2016 comme chargé de recherches au CNRS, dans la section 30 "Surface continentale et interfaces", à Géosciences Rennes. Il soutient son habilitation à diriger des recherches à l'université de Rennes en 2017. Il intègre l'IPGP dès 2022 en tant qu'invité, et obtient sa mutation en 2023. Ses travaux visent à mieux comprendre et prédire le comportement et le devenir des contaminants dans les milieux aquatiques, en se concentrant sur leur spéciation géochimique. Il s'intéresse particulièrement à l'effet des colloïdes naturels, principaux vecteurs de nombreux contaminants dans l'environnement.



Équipe Team: Biogéochimie à l'Anthropocène des éléments et contaminants émergents
Biogeochemistry at the Anthropocene of Elements and Emerging Contaminants

Thème Theme: Système Terre

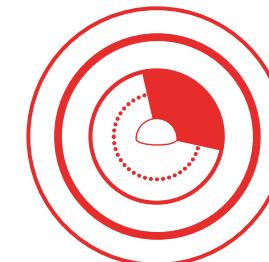
Earth System Science

Statut Position: Chargé de recherche CNRS

CNRS Research Fellow

Contact: marsac@ipgp.fr

After a degree in chemistry, Rémi Marsac obtained his PhD in Earth Sciences in 2011 at Géosciences Rennes (University of Rennes). He joined the Karlsruhe Institute for Nuclear Waste Disposal in Germany between 2011 and 2015. Then, he carried out a second postdoc at the École Nationale Supérieure de Chimie in Rennes. He was recruited as a CNRS Research Fellow in 2016, in section 30 "Continental surface and interfaces", at Géosciences Rennes and obtained his Habilitation at the University of Rennes in 2017. He joined the IPGP in 2022 as a guest and was transferred officially in 2023. His work aims to better understand and predict the behavior and fate of contaminants in aquatic environments, focusing on their geochemical speciation. He is particularly interested in the role of natural colloids, the main carriers of many contaminants in the environment.



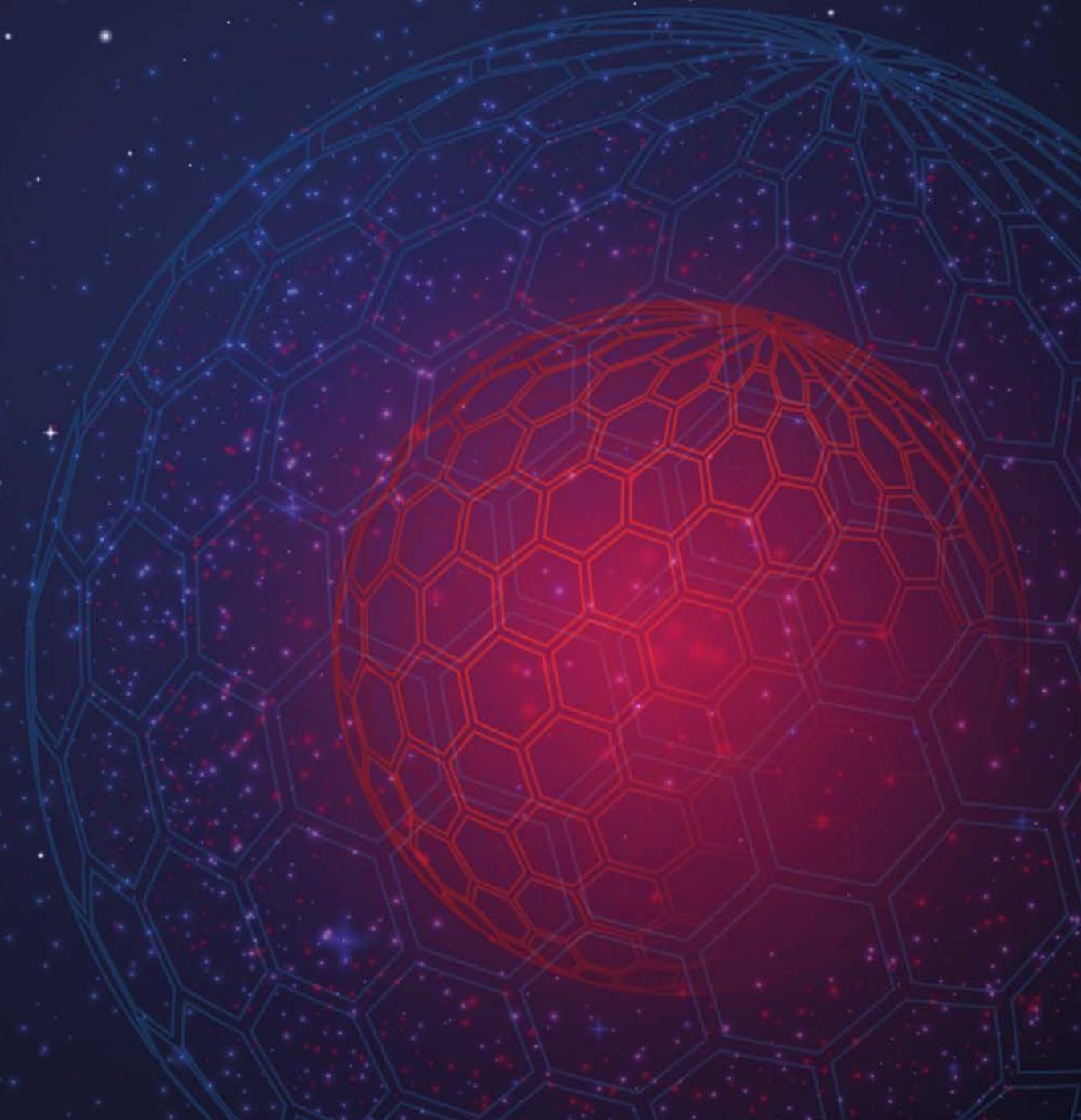
Intérieurs de la Terre et des planètes Earth and Planetary Interiors

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. Ainsi, un sismomètre développé à l'IPGP pour équiper l'atterrisseur InSight a transmis pendant plusieurs années les données sismiques de Mars, tandis que des expériences innovantes en conditions extrêmes de pression et de température permettent de répliquer les processus d'accrétion et d'évolution précoce de la Terre et des autres planètes (océans de magma, formation des noyaux).

Le thème revient notamment cette année sur une étude permettant de mieux comprendre la dynamique magmatique et les processus de nucléation de dikes dans la lithosphère océanique au niveau d'une dorsale rapide (Marjanovic *et al.*). Un autre article s'intéresse à la source et composition du manteau à l'origine du volcanisme des Comores à partir de la géochimie des roches du nouveau volcan sous-marin de Mayotte (Chauvel *et al.*). Enfin, Samuel *et al.* révèlent l'existence d'une couche fondue à la base du manteau de Mars à partir de l'analyse des données sismiques d'Insight.

The physico-chemical processes occurring inside the Earth are responsible for many observable phenomena on its surface, such as telluric and volcanic activity or the existence of the magnetic field. The internal dynamics of a planet determines its evolution over geological time and its understanding requires multidisciplinary research and the deployment of cutting-edge technological innovations. A seismometer developed at the IPGP to equip the InSight lander has transmitted unique seismic data from Mars for years, while innovative experiments under extreme pressure and temperature conditions make it possible to replicate the processes of accretion and early evolution of the Earth and other planets (magma oceans, core formation).

This year, the theme focuses on the magmatic dynamics and dike nucleation processes within the oceanic lithosphere at a fast-spreading mid-ocean ridge (Marjanovic *et al.*). Based on the geochemistry of volcanic rocks from the new Mayotte submarine volcano, Chauvel *et al.* better constrain the mantle composition and dynamics below the Comoros archipelago. Finally, Samuel *et al.*'s analysis of Insight seismic data has highlighted the existence of a molten layer at the base of the Mars mantle.



#1

Premières images haute résolution du dernier étage de la plomberie magmatique

First high-resolution images of the last stage of magma plumbing

Les modèles volcaniques démontrent que l'architecture des réseaux de plomberie magmatique, s'étendant du manteau terrestre à la surface, ainsi que l'évolution du magma à travers ces réseaux, jouent un rôle essentiel dans la formation et l'évolution des édifices volcaniques. Cependant, en raison de l'inaccessibilité de la plupart des systèmes volcaniques actifs à une imagerie haute résolution, la morphologie détaillée des réservoirs de magma et la relation entre le début de la remontée du magma et la dynamique des éruptions demeurent largement méconnues.

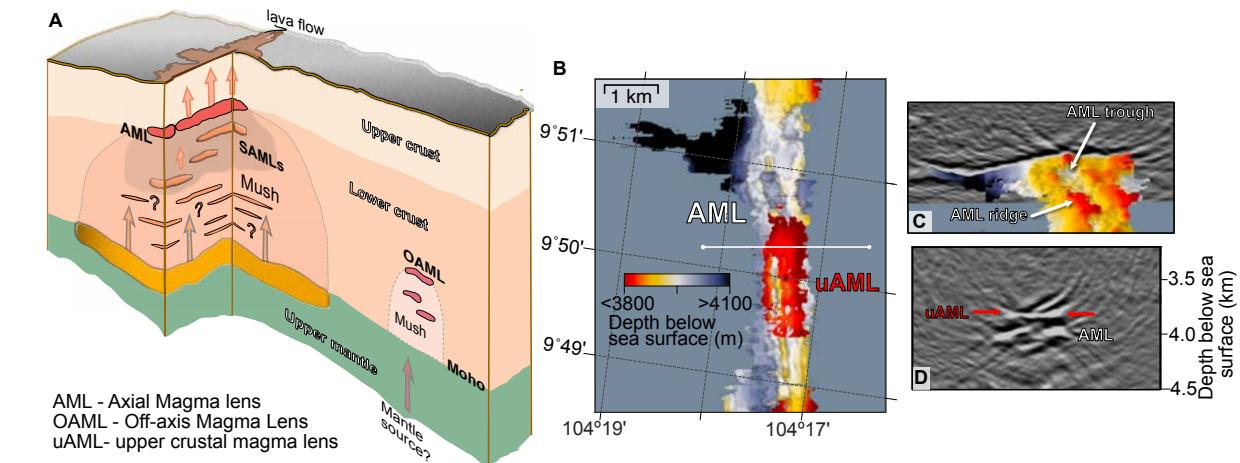
Une équipe internationale dirigée par Milena Marjanović, chercheuse CNRS à l'IPGP, présente des images sismiques inédites à haute résolution, éclairant l'architecture à petite échelle du réseau de corps magmatiques les moins profonds, situés sous une zone en éruption de la dorsale Est-Pacifique. Ces images, résultant d'une collaboration avec l'industrie géophysique ayant permis l'utilisation d'une technique d'imagerie de pointe, ont été obtenues par inversion des formes d'onde de données de sismique réflexion acquises lors de campagnes océanographiques en 2008.

L'étude révèle que les lentilles magmatiques les plus superficielles de la chambre magmatique, auparavant modélisées comme des structures lisses, présentent en réalité des crêtes et des creux interprétés comme des zones d'origine des dikes (filons de magma remontant depuis le réservoir jusqu'à la surface). Cette morphologie particulière serait façonnée par les processus de recharge du magma depuis le manteau et d'extraction du magma vers la surface. La répétition de ces processus laisse une empreinte, associée à la concentration des contraintes induites par la topographie, contribuant à la formation des dikes et au déclenchement de la remontée du magma vers la surface, influençant ainsi la dynamique des éruptions suivantes.

Volcanic models demonstrate that the architecture of magmatic plumbing systems, extending from the Earth's mantle to the surface, and the evolution of magma through these systems, play a crucial role in the formation and evolution of volcanic structures. However, due to the inaccessibility of most active volcanic systems to high-resolution imaging, the detailed morphology of magma reservoirs and the relationship between the onset of magma ascent and eruption dynamics remain largely unknown.

An international team led by Milena Marjanović, a CNRS researcher at the IPGP, presents unprecedented high-resolution seismic images, illuminating the small-scale architecture of the shallowest magmatic bodies located beneath an eruptive zone of the East Pacific Ridge. These images, resulting from collaboration with the geophysical industry enabling the use of advanced imaging techniques, were obtained by inverting waveform data from reflection seismic surveys conducted during oceanographic campaigns in 2008.

The study reveals that the shallowest magmatic lenses within the magma chamber, previously modeled as smooth bodies, actually exhibit ridges and troughs interpreted as zones of dike inception (magma veins ascending from the reservoir to the surface). This particular morphology is believed to be shaped by magma replenishment processes from the mantle and magma extraction towards the surface. The repetition of these processes leaves an imprint, associated with stress concentration induced by topography, contributing to dike formation and triggering magma ascent to the surface, thereby influencing the dynamics of subsequent eruptions.



A) Illustration schématique du système magmatique à l'aplomb de la dorsale Est-Pacifique, basée sur des données sismiques à haute résolution et à source contrôlée. B) C) et D) Morphologie 3D de la lentille magmatique sous la principale zone d'éruption de la dorsale Est-Pacifique, qui révèle la complexité des différents corps magmatiques, avec un corps plus profond et un sill plus petit (zone en rouge) qui s'est introduit dans la croûte supérieure pendant l'épisode éruptif. La ligne blanche marque l'emplacement de la section sismique extraite du volume sismique montré dans le panneau D.

A) Schematic illustration of the magmatic system at the East Pacific Rise based on high-resolution controlled-source seismic data. B) C) and D) 3D morphology of magmatic lens beneath the main eruption area of the East Pacific Rise, emphasizing the complexity of the magma bodies with the deeper magma body and a smaller (red area) sill intruded in the upper crust during the eruption episode. The white line marks the location of seismic section extracted from seismic volume shown in Panel D. Figure modified from Marjanović *et al.* (2023).

En intégrant ces nouveaux résultats dans les modèles numériques tridimensionnels de dernière génération, il devrait désormais être possible d'obtenir une représentation plus réaliste des systèmes volcaniques, contribuant ainsi à une meilleure localisation des éruptions et à une amélioration de l'évaluation des risques volcaniques.

By incorporating these new findings into state-of-the-art three-dimensional numerical models, it should now be possible to obtain a more realistic representation of volcanic systems, thereby contributing to better eruption localization and improved volcanic risk assessment.

Ref : M. Marjanović, S.M. Carbotte, A. Stopin, S.C. Singh, R.-E. Plessix, M. Marjanović, M.R. Nedimović, J.P. Canales, H. Carton, J.C. Mutter & J. Escartin, **Insights into dike nucleation and eruption dynamics from high-resolution seismic imaging of magmatic system at the East Pacific Rise**, *Sci. Adv.* 9, eadi2698, DOI : 10.1126/sciadv.adi2698

Contact : marjanovic@ipgp.fr

#2

Ce que Fani Maoré, le nouveau volcan de Mayotte, nous apprend sur le manteau profond

What Fani Maoré, the new volcano of Mayotte, teaches us about the deep mantle

En 2018, un nouveau volcan sous-marin s'est formé à environ 50 km à l'est de l'île de Mayotte, dans l'océan indien, donnant lieu à de nombreux séismes et amenant la population locale à s'inquiéter. L'étude géochimique des roches volcaniques collectées lors des différentes campagnes océanographiques menées sur zone a permis aux chercheurs de mieux comprendre l'origine de ce nouvel édifice, nommé Fani Maoré.

En effet, ces laves résultent de la fusion du manteau terrestre, permettant ainsi de retracer non seulement les processus de cette fusion, mais aussi la nature de la source profonde en étudiant leur composition en éléments traces. Il s'est avéré que les laves de Fani Maoré présentaient une composition chimique tout à fait exceptionnelle, indiquant la présence en excès de baryte dans leur source. Ce minéral

In 2018, a new underwater volcano formed approximately 50 km east of the island of Mayotte in the Indian Ocean, triggering numerous earthquakes and causing concern among the local population. Geochemical study of the volcanic rocks collected during various oceanographic expeditions in the area has allowed researchers to better understand the origin of this new edifice, named Fani Maoré.

Indeed, these lavas result from the melting of the Earth's mantle, enabling researchers to trace not only the processes of this melting but also the nature of the deep source by studying their trace element composition. It turned out that the lavas of Fani Maoré exhibited a highly exceptional chemical composition, indicating an excess

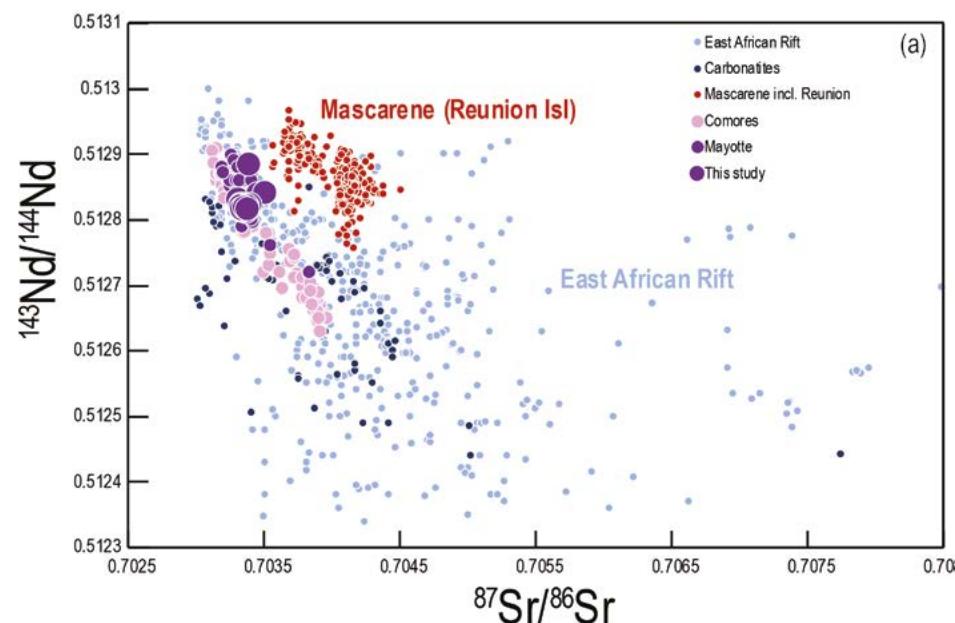


Figure montrant comment les compositions isotopiques du strontium et du néodyme des laves de Fani Maoré se distinguent des basaltes de l'île de La Réunion, écartant ainsi la possibilité d'une source commune dans le manteau profond.

Figure showing how the strontium and neodymium isotopic compositions of the Fani Maoré lavas differ from those of the Reunion Island basalts, ruling out the possibility of a common source in the deep mantle.

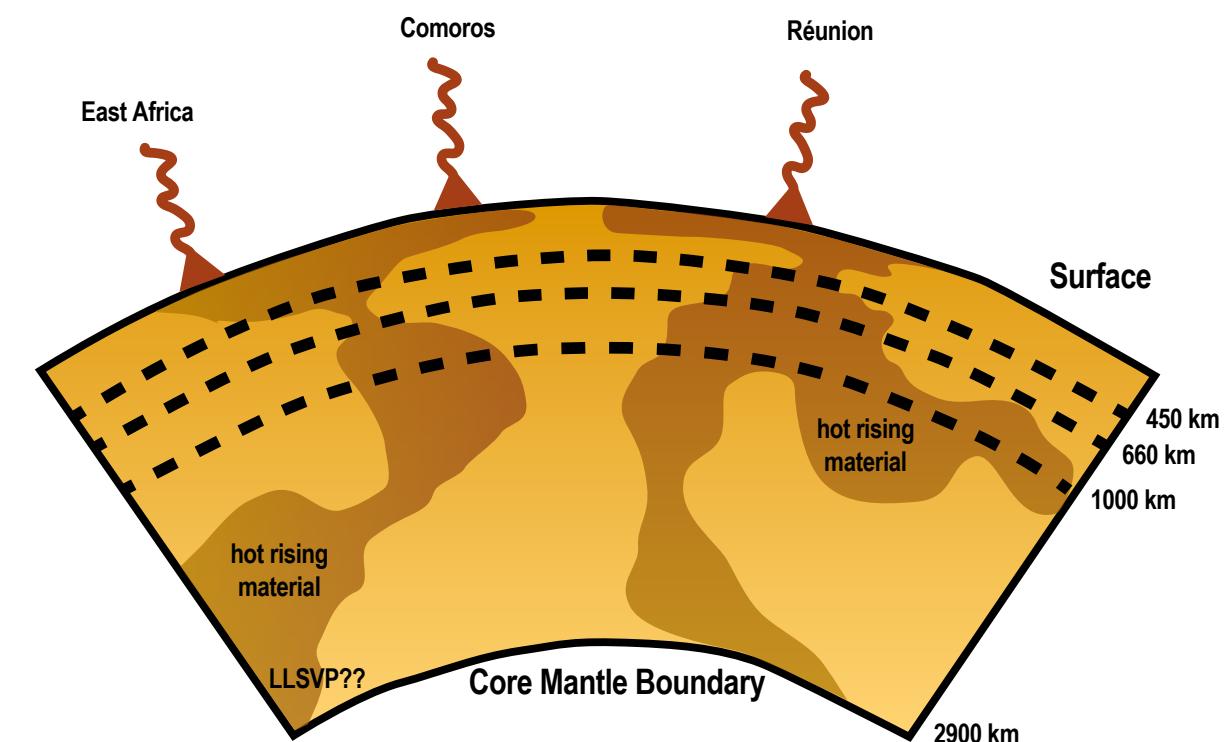


Schéma montrant l'origine profonde des magmas formant le volcan Fani Maoré dans l'archipel des Comores et leur lien avec les volcans du rift est-africain.
Diagram showing the deep-seated origin of the magmas that form the Fani Maoré volcano in the Comoros archipelago and their link with the volcanoes of the East African Rift.

se forme par l'interaction entre les basaltes de la croûte océanique et l'eau de mer environnante. Cette singularité démontre que la source du nouveau volcan inclut des matériaux qui étaient jadis présents dans les fonds océaniques, lesquels ont ensuite été recyclés dans le manteau profond, pour finalement être fondues des millions d'années plus tard, aboutissant ainsi à la création d'un nouveau volcan.

Les particularités chimiques et isotopiques de Fani Maoré permettent également d'établir un lien originel entre le volcanisme de la chaîne des Comores et celui du rift est-africain, écartant ainsi la thèse d'une source commune avec les volcans des îles de La Réunion et Maurice.

presence of barite in their source. This mineral forms through the interaction between oceanic crust basalts and surrounding seawater. This uniqueness demonstrates that the source of the new volcano includes materials that were once present in oceanic depths, which were subsequently recycled into the deep mantle and melted millions of years later, resulting in the creation of a new volcano.

The chemical and isotopic peculiarities of Fani Maoré also help establish an original link between the volcanism of the Comoros chain and that of the East African Rift, thereby dismissing the hypothesis of a common source with the volcanoes of La Réunion and Mauritius.

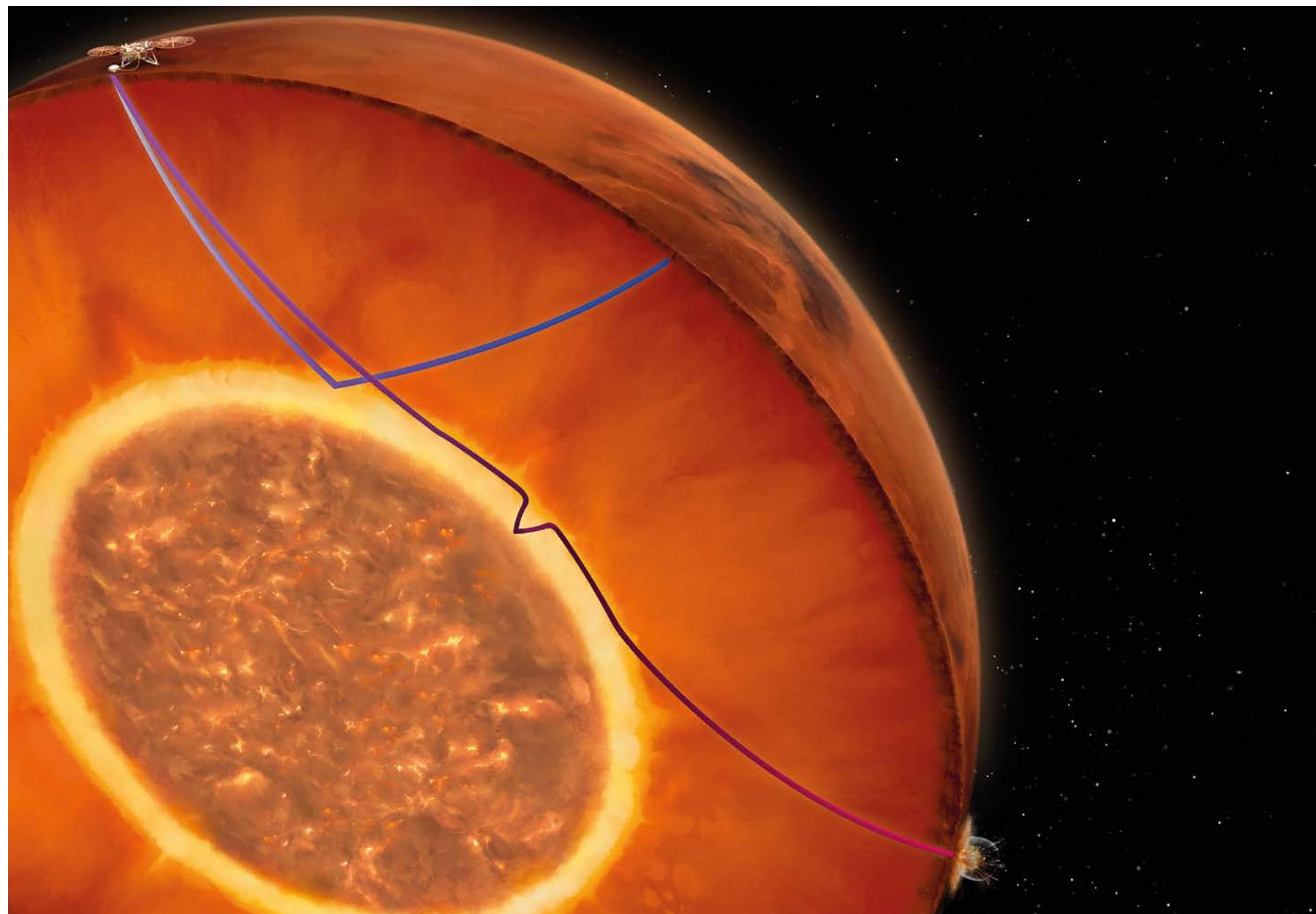
Ref : C. Chauvel, E.C. Inglis, P. Gutierrez, T.-H. Luu, P. Burckel, P. Besson, **Fani Maoré, a new “young HIMU” volcano with extreme geochemistry.** *Earth and Planetary Science Letters*, 626: 118529, DOI : 10.1016/j.epsl.2023.118529.

Contact : chauvel@ipgp.fr

#3

La mission InSight révèle une couche fondue à la base du manteau martien

InSight seismic data reveals a molten layer at the base of the Martian mantle



Les premières données de la mission InSight ont permis de déterminer la structure interne de la planète Mars dans une série de publications de l'équipe scientifique parue à l'été 2021. Mais depuis, l'analyse de nouvelles données générées par un puissant impact de météorite survenu le 18 septembre 2021 remet en question les premières estimations de la structure interne de la planète rouge. En étudiant les temps de propagation d'ondes générées par cet impact, une équipe internationale menée par Henri Samuel, chercheur CNRS à l'Institut de physique du globe de Paris, a mis en évidence la présence d'une couche de silicates fondues à la base du manteau martien surplombant le noyau métallique. Ce nouveau modèle de structure plus réaliste au regard de l'ensemble des données géophysiques, permet également d'expliquer de façon cohérente l'évolution de Mars depuis sa formation.

The first data from the InSight mission have allowed determining the internal structure of the planet Mars in a series of publications by the scientific team released in the summer of 2021. However, the analysis of new data generated by a powerful meteorite impact that occurred on September 18, 2021, challenges the initial estimates of the internal structure of the red planet. By studying the wave propagation times generated by this impact, an international team led by Henri Samuel, a CNRS researcher at the Institut de physique du globe de Paris, has highlighted the presence of a layer of molten silicates at the base of the Martian mantle overlying the metallic core. This new, more realistic structural model, in light of all geophysical data, also provides a coherent explanation for Mars' evolution since its formation.

Vue d'artiste de la structure interne de Mars montrant la propagation des ondes diffractées issues de l'impact de météorite de septembre 2021 jusqu'au sismomètre SEIS de la mission InSight. Leur trajet passe dans la partie inférieure et totalement fondu de la couche de silicates à la base du manteau, où les vitesses sismiques sont faibles.

Artist's view of the internal structure of Mars showing the propagation of diffracted waves from the September 2021 meteorite impact to the SEIS seismometer of the InSight mission. Their trajectory passes through the lower, completely molten part of the silicate layer at the base of the mantle, where seismic velocities are low.

En particulier, la mise en évidence de cette stratification du manteau martien élucide la propagation anormalement lente, jusqu'alors inexpiquée, des ondes diffractées issues de l'impact de météorite de septembre 2021 par leur trajectoire dans la partie inférieure et totalement fondu de la couche de silicates à la base du manteau, où les vitesses sismiques sont faibles. Par ailleurs, pour plusieurs événements sismiques plus anciens, les temps d'arrivée des ondes mesurés à la surface de Mars sont compatibles avec des réflexions d'ondes de cisaillement sur la couche fondue (située à plusieurs dizaines de kilomètres au-dessus du noyau métallique) et non pas à l'interface noyau-manteau comme précédemment supposé. Enfin, la présence de cette couche de silicates permet d'expliquer la trajectoire observée de la lune martienne Phobos. En effet, la partie supérieure et partiellement fondu de la couche basale permet de dissiper efficacement les déformations générées par l'attraction gravitationnelle de Phobos. En revanche, le manteau solide au-dessus de cette couche est plus rigide et sismiquement peu atténuant, comme le suggère la détection à la surface de Mars d'ondes associées à des événements sismiques de magnitudes relativement faibles.

Un noyau plus petit et plus dense qu'envisagé

La présence de cette couche fondue à la base du manteau implique un noyau métallique 150 à 170 km plus petit (soit un rayon de 1650 ± 20 km) et 5 à 8 % plus dense (soit 6,5 g/cm) que les estimations sismiques précédentes. Ce noyau serait donc composé d'un alliage ayant moins d'éléments légers que précédemment requis, et plus compatible avec les données cosmochimiques issues de l'analyse des météorites martiennes et les expériences de hautes pressions. Les auteurs de l'étude proposent ainsi que Mars a vraisemblablement connu un stade précoce d'océan magmatique dont la cristallisation a produit une couche stable à la base du manteau, fortement enrichie en fer et en éléments radioactifs. La chaleur dégagée par ces derniers a généré une couche basale de silicates fondu située au-dessus du noyau, recouverte par une couche partiellement fondu plus fine.

L'étude précise en outre qu'une telle stratification du manteau isole le noyau métallique, l'empêchant ainsi de se refroidir et de générer une dynamo thermique. "L'isolement thermique du noyau métallique de Mars par la couche liquide à la base du manteau implique que des sources externes sont nécessaires pour générer le champ magnétique enregistré dans la croûte martienne au cours des premiers 500-800 millions d'années d'évolution.

In particular, the identification of this stratification of the Martian mantle elucidates the abnormally slow propagation, previously unexplained, of diffracted waves resulting from the September 2021 meteorite impact by their trajectory in the lower and completely molten part of the silicate layer at the base of the mantle, where seismic velocities are low. Furthermore, for several older seismic events, the arrival times of the waves measured on the surface of Mars are compatible with shear wave reflections on the molten layer (located several tens of kilometers above the metallic core) rather than at the core-mantle interface as previously assumed. Finally, the presence of this silicate layer explains the observed trajectory of the Martian moon Phobos. Indeed, the upper and partially molten part of the basal layer effectively dissipates the deformations generated by Phobos' gravitational attraction. In contrast, the solid mantle above this layer is more rigid and seismic damping, as suggested by the detection on the surface of Mars of waves associated with relatively low magnitude seismic events.

A smaller and denser core than previously envisaged

The presence of this molten layer at the base of the mantle implies a metallic core 150 to 170 km smaller (thus a radius of 1650 ± 20 km) and 5 to 8 % denser (i.e., 6.5 g/cm) than previous seismic estimates. This core would therefore consist of an alloy with fewer light elements than previously required and more compatible with cosmochemical data from the analysis of Martian meteorites and high-pressure experiments. The study thus suggests that Mars likely experienced an early stage of magmatic ocean whose crystallization produced a stable layer at the base of the mantle, heavily enriched in iron and radioactive elements. The heat released by these elements generated a basal layer of molten silicates located above the core, covered by a thinner partially molten layer.

The study further specifies that such mantle stratification isolates the metallic core, preventing it from cooling and generating a thermal dynamo. "The thermal isolation of Mars' metallic core by the liquid layer at the base of the mantle implies that external sources are necessary to generate the magnetic field recorded in the Martian crust during the first 500-800 million years of evolution.

Ces sources pourraient être des impacts énergétiques, ou encore des mouvements du noyau générés par des interactions gravitationnelles avec d'anciens satellites qui auraient depuis disparu" précise Henri Samuel.

Cette structure stratifiée de l'intérieur du manteau de Mars qui contraste avec celle de la Terre témoigne d'une évolution interne différente de ces deux planètes. Mélanie Drilleau, ingénierie de recherche à l'ISAE-SUPAERO et co-auteure de l'étude explique que "la découverte de cette stratification du manteau martien ouvre de nouveaux horizons de recherche, puisque les données sismiques enregistrées par l'instrument SEIS de la mission InSight seront désormais reconsidérées à la lumière de ce nouveau paradigme".

These sources could be energetic impacts or core movements generated by gravitational interactions with ancient satellites that have since disappeared," explains Henri Samuel.

This stratified structure of Mars' mantle interior, contrasting with that of Earth, reflects a different internal evolution of these two planets. Mélanie Drilleau, a research engineer at ISAE-SUPAERO and co-author of the study, explains that "the discovery of this stratification of the Martian mantle opens up new avenues of research, as seismic data recorded by the InSight mission's SEIS instrument will now be reconsidered in light of this new paradigm."

Ref : H. Samuel, M. Drilleau, A. Rivoldini, Z. Xu, Q. Huang, R. F. Garcia, V. Lekic, J.C.E Irving, J. Badro, P. H. Lognonné, J. A. D. Connolly, T. Kawamura, T. Gudkova and W. B. Banerdt, **Geophysical evidence for an enriched molten silicate layer above Mars' core**, *Nature*, DOI : 10.1038/s41586-023-06601-8

Contact : samuel@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.

Cette édition 2023 du rapport annuel met en avant la caractérisation d'un glissement de terrain majeur à la Réunion à travers l'étude d'images aériennes (Michon *et al.*), la mise en évidence d'une saisonnalité dans la microsismicité du volcan de la Soufrière de Guadeloupe (Pantobe *et al.*), ainsi qu'une nouvelle méthode pour déterminer la magnitude des grands séismes à travers l'analyse des signaux sismiques et gravitaires, permettant ainsi d'améliorer l'alerte précoce (Juhel *et al.*).

Understanding the origin and functioning of volcanic eruptions, earthquakes, tsunamis, landslides and magnetic storms is a major challenge for understanding the associated hazards and risks. These natural phenomena are the result of geological processes occurring on various time and space scales, and their analysis covers almost all the branches of the Earth sciences. Their study at the IPGP combines field approaches (continuous or punctual observations and measurements, in observatories, during sea campaigns, etc.), observations from space, laboratory studies and analyses of samples, as well as theoretical modelling.

This 2023 edition of the annual report highlights the characterisation of a major landslide on Réunion using aerial image analysis (Michon *et al.*), the identification of a seasonal pattern in the microseismicity of the Soufrière of Guadeloupe volcano (Pantobe *et al.*), and finally a new method for determining the magnitude of major earthquakes by analyzing seismic and gravity signals, to improve early warning (Juhel *et al.*).

#1

Le glissement de terrain de Mahavel (1965, île de la Réunion) réinterprété

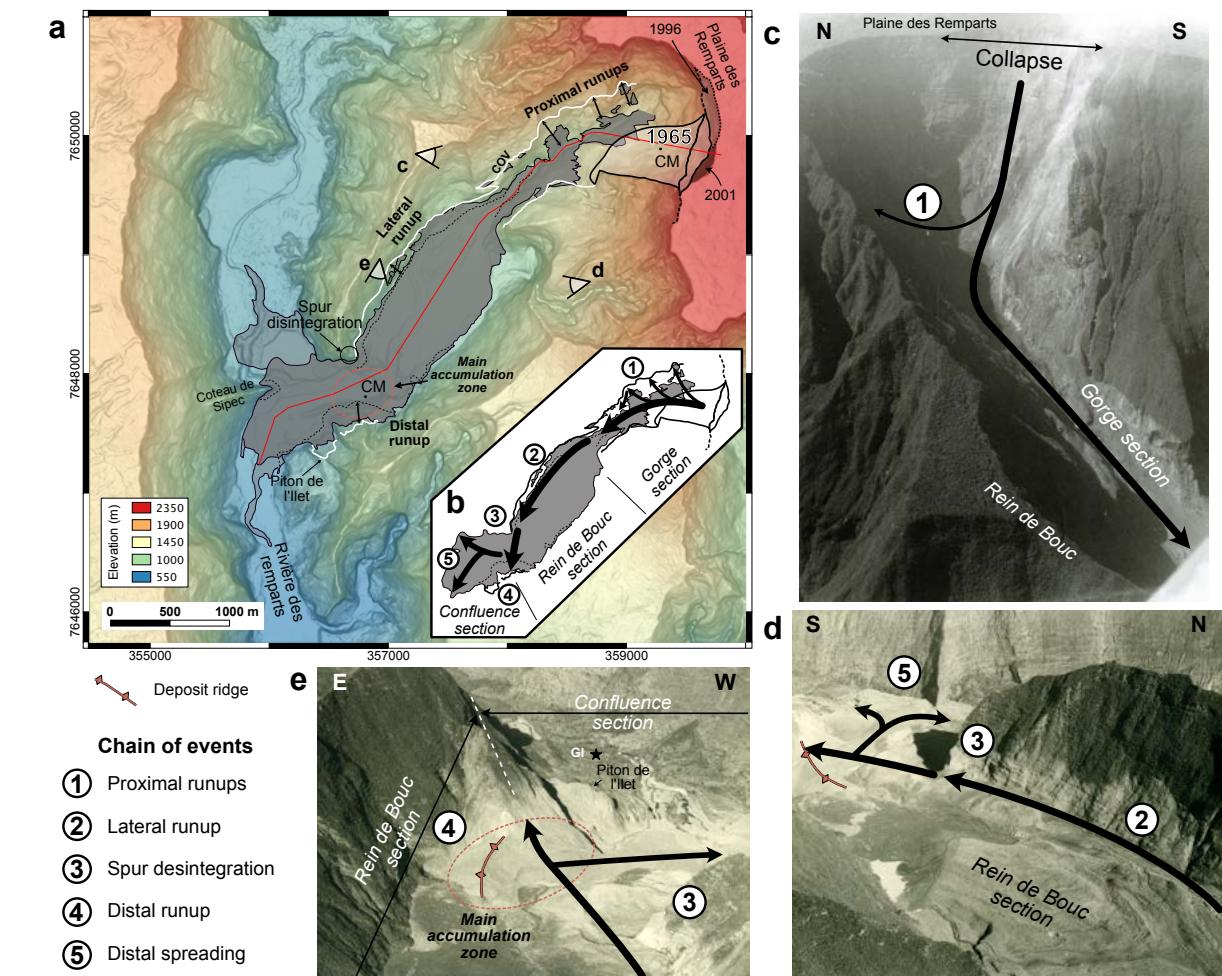
The Mahavel Landslide (1965, Réunion Island) reinterpreted

En 1965, un glissement de terrain majeur s'est produit dans l'une des nombreuses vallées très encaissées de l'île de La Réunion, la rivière des Remparts. Cet événement, qui n'a heureusement pas fait de victimes, est survenu suite à l'effondrement d'une falaise de plus de 900 m de hauteur consécutif à de fortes pluies. Initialement interprété comme une coulée de boue, ce processus a été réévalué dans une étude récente menée par une équipe de chercheurs de l'IPGP. Pour ce faire, ils ont utilisé des photographies aériennes historiques datant de 1961 et 1966, ont décrit les dépôts associés sur le terrain, et ont réalisé des simulations numériques.

Cette analyse détaillée a révélé qu'environ 60 millions de m³ de roches volcaniques se sont subitement effondrées, parcourant une distance totale de 5 km, à des vitesses comprises entre 44 et 86 m.s⁻¹. Ainsi, ce glissement de terrain est désormais interprété comme une importante avalanche de roches plutôt que comme une coulée de boue. De plus, les résultats obtenus suggèrent que la variabilité annuelle des précipitations est très probablement l'un des principaux facteurs favorisant les effondrements de roches et, par conséquent, l'un des moteurs principaux de l'érosion à La Réunion, ainsi que dans d'autres environnements similaires. Par conséquent, l'augmentation de la variabilité des précipitations induite par le réchauffement climatique pourrait accroître l'occurrence de grands effondrements et d'avalanches de roches dans les zones montagneuses.

In 1965, a major landslide occurred in one of Réunion's many steep-sided valleys, the Rivière des Remparts. The event, which fortunately caused no casualties, was triggered by the collapse of a cliff over 900 m high following heavy rainfall. Initially interpreted as a mudflow, this process was reassessed in a recent study by a team of IPGP researchers. To do this, they used historical aerial photographs dating from 1961 and 1966, described the associated deposits on the ground, and carried out numerical simulations.

This detailed analysis revealed that around 60 million m³ of volcanic rock suddenly collapsed, covering a total distance of 5 km, at speeds of between 44 and 86 m.s⁻¹. As a result, this landslide is now being interpreted as a major rock avalanche rather than a mudflow. Furthermore, the results obtained suggest that the annual variability of rainfall is very likely to be one of the main factors favouring rock collapses and, consequently, one of the main drivers of erosion in Réunion, as well as in other similar environments. Consequently, the increase in rainfall variability induced by global warming could increase the occurrence of large rock collapses and avalanches in mountainous areas.



Succession d'événements proposée pour l'avalanche de roches de Mahavel en 1965. a) Dépôts de débris (zone grise), limites latérales (ligne blanche) et de run-up sur les bords de la vallée du Bras de Mahavel. Les zones en gris clair indiquent les dépôts remobilisés, observés en 1966. Les coordonnées sont données en mètres, dans le système WGS 84/UTM (zone 40S). COV = Cap des Oiseaux Verts. b) Schéma de la chaîne des événements proposé pour l'avalanche de roches de Mahavel, à partir des photos aériennes (c-e).

Proposed sequence of events for the 1965 Mahavel rock avalanche. a) Debris deposits (grey area), lateral limits (white line) and run-up on the edges of the Bras de Mahavel valley. The light grey areas indicate the remobilised deposits observed in 1966. Coordinates are given in metres, in the WGS 84/UTM system (zone 40S). COV= Cap des Oiseaux Verts. b) Diagram of the proposed chain of events for the Mahavel rock avalanche, based on aerial photos (c-e).

Ref : L. Michon, E. Gayer, A. Lucas, F. Bellin, M. Gougeon, **The 1965 Mahavel landslide (Réunion Island, Indian Ocean): Morphology, volumes, flow dynamics, and causes of a rock avalanche in tropical setting.** *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 128, e2022JF006944, DOI : 10.1029/2022JF006944.

Contact : michon@ipgp.fr

#2

Quand la Soufrière de Guadeloupe révèle une microsismicité au rythme des saisons

When the Soufrière volcano of Guadeloupe reveals seasonal microseismicity

Les éruptions phréatiques, résultant de l'interaction entre le magma et l'eau à faible profondeur, sont capables de générer des éruptions particulièrement violentes. Néanmoins, elles restent compliquées à anticiper car l'activité sismique qui les précède est généralement faible et donc difficile à détecter et à interpréter. Mieux mesurer et comprendre la dynamique de la sismicité superficielle associée aux systèmes hydrothermaux demeure donc un enjeu majeur pour la surveillance.

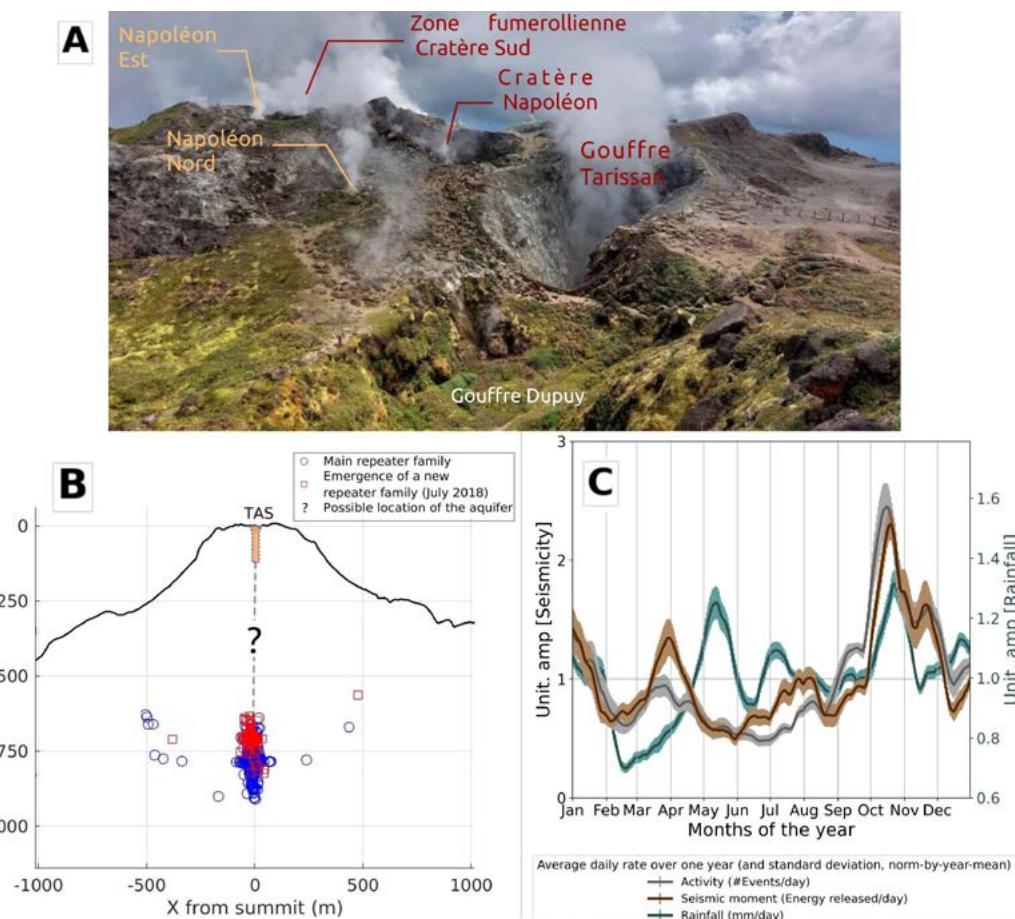
L'activité sismo-volcanique de la Soufrière de Guadeloupe est aujourd'hui essentiellement liée à son système hydrothermal. La microsismicité est principalement enregistrée sous la forme d'essaims et caractérisée par des répétateurs sismiques, c'est-à-dire une succession de séismes dont l'origine et la source s'avèrent quasi-identiques. Le déploiement d'un réseau dense de capteurs sismologiques sur le dôme de la Soufrière, de novembre 2017 à janvier 2018, a permis une avancée significative dans l'analyse de cette activité. En effet, en étudiant l'ensemble des événements détectés pendant la période d'acquisition, une équipe de chercheurs de l'IPGP a pu diminuer le bruit des signaux sismiques et affiner ainsi la localisation de la source de l'activité microsismique hydrothermale, située le long d'un conduit sub-vertical, à moins d'un kilomètre sous le lac acide du gouffre Tarissan, au sommet de la Soufrière.

L'évolution temporelle de la microsismicité du dôme suggère que le séisme d'avril 2018 de magnitude 4,1, survenu à 4 km du dôme, s'est révélé un point de bascule pour l'activité sismique superficielle de la Soufrière, marquée par son augmentation et l'apparition d'une nouvelle famille de répétateurs. Le passage des ondes de surface générées par cet événement semble avoir endommagé le dôme, entraînant une possible extension de fractures préexistantes. Enfin, une analyse statistique révèle une variabilité saisonnière de l'activité microsismique, avec des augmentations significatives en octobre-novembre et en avril. Ces variations semblent être influencées par le cycle hydrologique régional, entraînant une possible augmentation de la pression des fluides dans le système hydrothermal.

Phreatic eruptions, resulting from the interaction between magma and shallow water, are capable of generating particularly violent eruptions. However, they remain challenging to anticipate because the seismic activity preceding them is generally low and therefore difficult to detect and interpret. Therefore, better measuring and understanding the dynamics of surface seismicity associated with hydrothermal systems remains a major challenge for monitoring.

The seismic-volcanic activity of the Soufrière of Guadeloupe is primarily linked to its hydrothermal system. Microseismicity is mainly recorded in the form of swarms and characterized by seismic repeaters, meaning a succession of earthquakes with almost identical origins and sources. The deployment of a dense network of seismological sensors on the dome of the Soufrière, from November 2017 to January 2018, significantly advanced the analysis of this activity. By studying all events detected during the acquisition period, a team of researchers from the IPGP was able to reduce the noise of seismic signals and thereby refine the location of the source of hydrothermal microseismic activity, located along a sub-vertical conduit, less than one kilometer beneath the acidic lake of the Tarissan abyss, at the summit of the Soufrière.

The temporal evolution of dome microseismicity suggests that the April 2018 earthquake with a magnitude of 4.1, occurring 4 km from the dome, proved to be a turning point for the superficial seismic activity of the Soufrière, marked by its increase and the appearance of a new family of repeaters. The passage of surface waves generated by this event seems to have damaged the dome, leading to a possible extension of pre-existing fractures. Finally, a statistical analysis reveals seasonal variability in microseismic activity, with significant increases in October-November and April. These variations appear to be influenced by the regional hydrological cycle, leading to a possible increase in fluid pressure in the hydrothermal system.



A. Photographie du sommet de la Soufrière ; B. Localisation hypocentrale de la microsismicité superficielle de la Soufrière sous le gouffre Tarissan (TAS) durant un essaim typique (18 au 21 octobre 2021). La famille de répétateurs principalement détectée est indiquée en bleu, tandis que la deuxième famille émergeant à la suite du séisme d'avril 2018 est représentée en rouge ; C. Moyenne journalière du taux de sismicité (en gris), moment sismique (en marron) et précipitations à la station SANNER (en bleu) sur une année typique. Les taux sont normalisés par la moyenne annuelle.

A. Photograph of the Soufrière summit; B. Hypocentral location of the Soufrière shallow microseismicity below Tarissan chasm (TAS) during a typical swarm (October 18 to 21, 2021). The primarily detected repeater family is shown in blue, while the second family emerging following the April 2018 earthquake is represented in red; C. Daily average of seismicity rate (gray), seismic moment (brown) and rainfall rate at SANNER station (blue) over a typical year. Rates are normalized by the annual mean.

Cette étude met en évidence l'importance de l'instrumentation dense et d'une approche intégrée, combinant sismologie et hydrologie, pour mieux comprendre l'activité microsismique superficielle des systèmes hydrothermaux actifs.

This study highlights the importance of dense instrumentation and an integrated approach, combining seismology and hydrology, to better understand the superficial microseismic activity of active hydrothermal systems.

Ref : L. Pantobe, A. Burtin, K. Chanard & J. C. Komorowski, **Evolution of shallow volcanic seismicity in the hydrothermal system of La Soufrière de Guadeloupe following the April 2018 M_v 4.1 earthquake.**

Journal of Volcanology and Geothermal Research, DOI : 10.1016/j.jvolgeores.2023.107989.

Contact : pantobe@ipgp.fr

#3

Caractériser plus tôt les grands séismes grâce à l'analyse conjointe de la phase W et des signaux élasto-gravitaires

Earlier characterisation of major earthquakes through joint analysis of W phase and elasto-earthquake signals

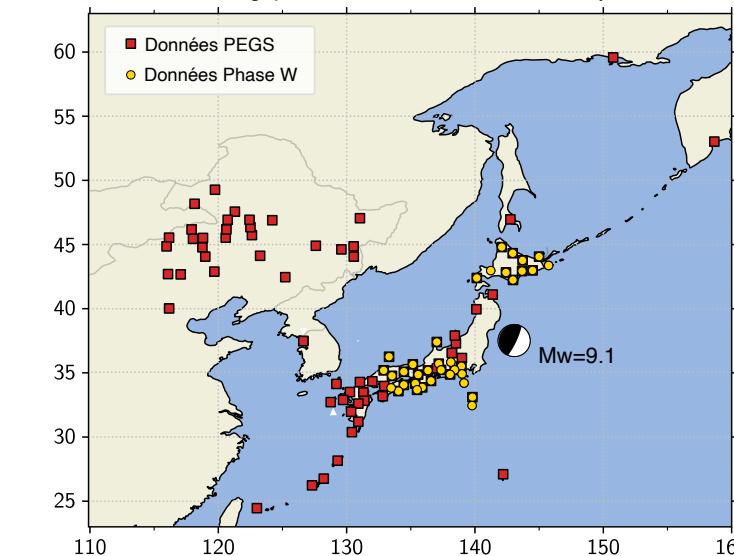
La détermination rapide des caractéristiques globales de la source d'un séisme, telles que sa magnitude et son mécanisme au foyer, revêt une importance cruciale pour évaluer rapidement la probabilité de la génération d'un tsunami et son ampleur potentielle. Dans ce contexte, la méthode de la phase W est reconnue pour sa fiabilité, même lors de très grands tremblements de terre. Sa version classique fournit une solution stable 20 à 25 minutes après le temps origine du séisme (c'est-à-dire l'heure exacte du début du processus de rupture), en utilisant les données à longue période des réseaux sismologiques globaux. Une solution plus rapide peut être obtenue à partir des données régionales, plus proches, mais elle est limitée par le fait que la source des grands séismes ne se résume pas à un point précis, mais plutôt à tout un plan qui glisse. Une troisième approche utilise les signaux élasto-gravitaires précoce (PEGS), mis en évidence il y a quelques années. Ces signaux, particulièrement sensibles à la magnitude et pouvant être observés avant l'arrivée de l'onde P, peuvent conduire à une activation plus précoce de l'alerte sismique pour les grands séismes. Leur principale limitation provient du faible nombre d'observations présentant un bon rapport signal/bruit, compliquant ainsi la détermination conjointe du mécanisme et de la magnitude.

Dans ce contexte, une équipe comprenant plusieurs chercheurs de l'IPGP a exploré comment les PEGS et la phase W pouvaient se compléter pour accélérer la caractérisation de la source des séismes. Le séisme de Tohoku, au Japon, en mars 2011 (magnitude 9,1), particulièrement bien instrumenté et documenté, constitue le cas d'étude le plus approprié pour quantifier les bénéfices respectifs de chacun de ces signaux et évaluer le gain d'une approche conjointe. L'application de la phase W aux données régionales permet de caractériser le séisme de manière précise dix minutes après le temps origine. De leur côté, les PEGS sont capables de mettre en évidence, trois minutes seulement après le temps origine, que le séisme est de très forte magnitude (supérieure à 8,6),

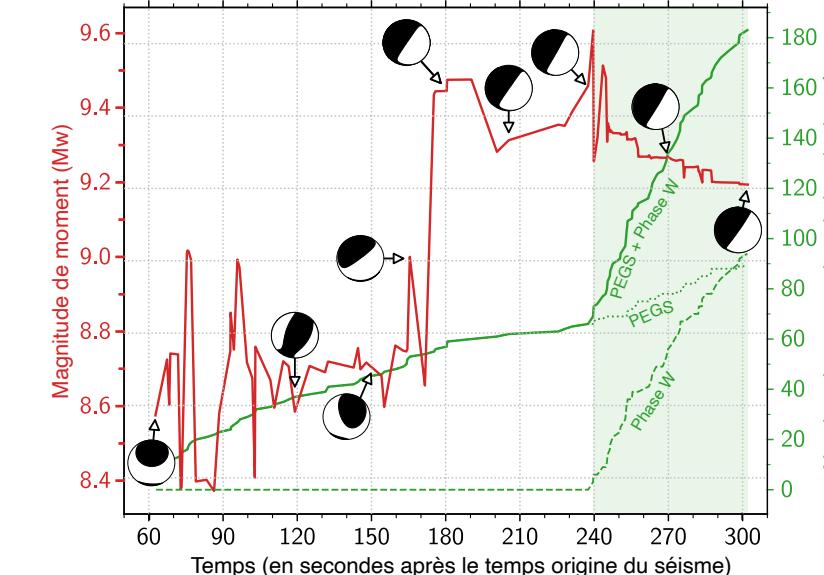
The rapid determination of key characteristics of a seismic event, such as its magnitude and focal mechanism, is crucial for swiftly assessing the likelihood of a tsunami occurrence and its potential impact. In this regard, the W-phase method is renowned for its reliability, even during extremely large earthquakes. Its conventional version yields a stable solution 20 to 25 minutes after the seismic origin time (i.e., the exact onset of rupture), utilizing long-period data from global seismological networks. While a quicker solution can be derived from regional data, it is constrained by the fact that the source of major earthquakes is not merely a precise point but rather an entire slipping plane. A third approach involves early elastic-gravitational signals (PEGS), identified a few years ago. These signals, particularly sensitive to magnitude and detectable prior to the arrival of the P-wave, could lead to earlier activation of seismic alerts for major earthquakes. Their primary limitation stems from the limited number of observations with a favorable signal-to-noise ratio, complicating the simultaneous determination of both mechanism and magnitude.

Against this backdrop, a team comprising several researchers from the IPGP explored how PEGS and the W-phase could complement each other to expedite the characterization of seismic sources. The Tohoku earthquake in Japan, March 2011 (magnitude 9.1), exceptionally well-instrumented and documented, serves as the most suitable case study for quantifying the respective benefits of each signal and assessing the advantage of a combined approach. Applying the W-phase to regional data allows for a precise characterization of the earthquake ten minutes after the origin time. On the other hand, PEGS can highlight, just three minutes after the origin time, that the earthquake is of very high magnitude (greater than 8.6), albeit with

Stations sismologiques utilisées dans l'inversion conjointe



Inversion conjointe à différents temps après l'origine du séisme



Résultats de l'analyse conjointe des PEGS et de la phase W pour le séisme de Tohoku. La carte du haut indique les stations et les types de données utilisés. La figure du bas montre l'évolution de la détermination de la magnitude (en rouge) et du mécanisme, en fonction du temps depuis l'origine du séisme. L'évolution du nombre et du type de signaux pouvant être inclus dans l'analyse est également indiquée (courbes vertes). Avant 240s, seuls les PEGS peuvent être utilisés. L'ajout des phases W à partir de ce temps conduit à une rapide stabilisation de la solution obtenue.

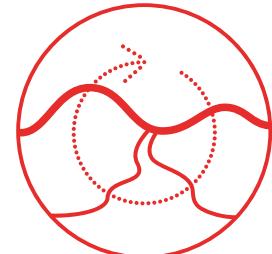
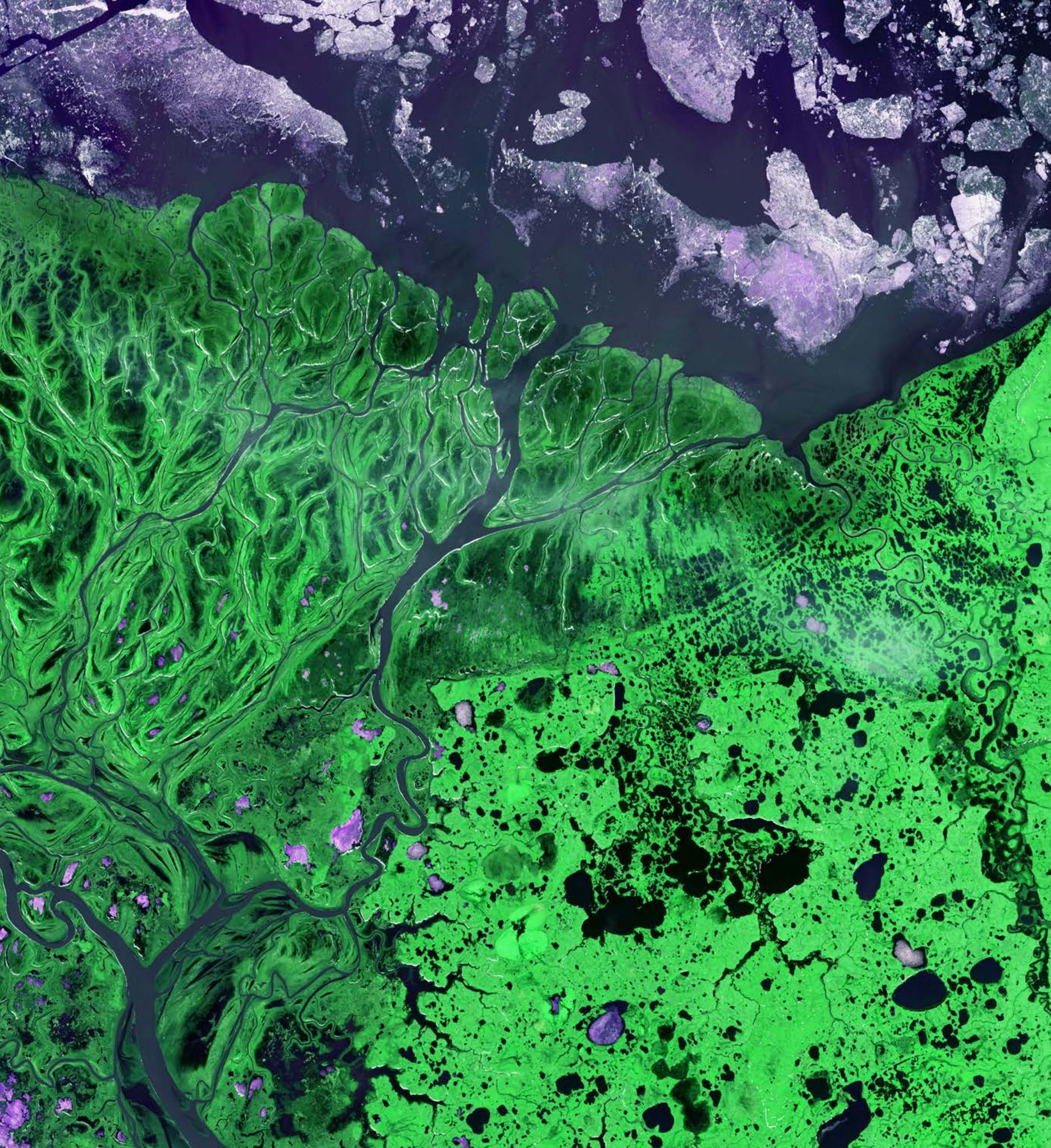
Results of the joint PEGS and W-phase analysis for the Tohoku earthquake. The top map shows the stations and types of data used. The lower figure shows the evolution of the determination of the magnitude (in red) and the mechanism, as a function of time since the origin of the earthquake. The evolution of the number and type of signals that can be included in the analysis is also shown (green curves). Before 240s, only PEGS can be used. The addition of W phases after this time leads to rapid stabilization of the solution obtained.

mais avec des incertitudes sur la borne supérieure de la magnitude et, à un degré moindre, sur le mécanisme au foyer. Enfin, l'utilisation conjointe des PEGS et de phases W proches permet de réduire à cinq minutes le temps requis pour une détermination solide de la magnitude et du mécanisme. Ces résultats très prometteurs ouvrent de nouvelles perspectives pour l'alerte précoce des grands séismes.

uncertainties regarding the upper bound of magnitude and, to a lesser extent, the focal mechanism. Lastly, the joint use of nearby PEGS and W-phases reduces the time required for a robust determination of magnitude and mechanism to five minutes. These highly promising findings open up new avenues for early warning of major earthquakes.

Ref : K. Juhel, Z. Duputel, L. Rivera & M. Vallée, **Early Source Characterization of Large Earthquakes Using W Phase and Prompt Elastogravity Signals**, *Seismological Research Letters*, DOI: 10.1785/0220230195

Contacts : duputel@ipgp.fr | vallee@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 mélagent 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.

Cette année, le thème met notamment en avant le développement d'un modèle reproduisant le transport de sédiments, nutriments et contaminants de la rivière Capesterre en Guadeloupe (Bernard *et al.*). Un autre article montre que des données isotopiques de terrain permettent de tracer l'association du chrome aux oxydes de fer dont la formation dépend des conditions redox du sol (Qin *et al.*). Enfin, une étude dévoile l'utilisation de signatures isotopiques du lithium dans les sédiments d'un lac pré-alpin pour comprendre l'évolution de la zone critique depuis la dernière déglaciation (Zhang *et al.*).

The Earth System Science theme focuses on understanding the interactions between the outer layers of our planet (lithosphere, hydrosphere, biosphere and atmosphere) and by extension the celestial bodies of the solar system. These environments, where living organisms, air, water and rocks interact, are the site of chemical transformations, biological reactions and fluxes of energy and matter. They play a major environmental role in the evolution of surfaces, especially the Critical Zone, defined as the outermost layer of our planet extending from the base of aquifers to the top of the atmospheric boundary layer. By concentrating most human activities, the Critical Zone is subject to rapid and profound changes affecting living organisms and their environment.

This year, the theme highlights the development of a model reproducing the transport of sediments, nutrients and contaminants in the Capesterre River in Guadeloupe (Bernard *et al.*). Another article shows that isotopic field data highlight the association of chromium with iron oxides, the formation of which depends on soil redox conditions (Qin *et al.*). Finally, a study reveals the use of lithium isotopic signatures in a pre-alpine lake to understand the evolution of the critical zone over the last 12 000 years (Zhang *et al.*).

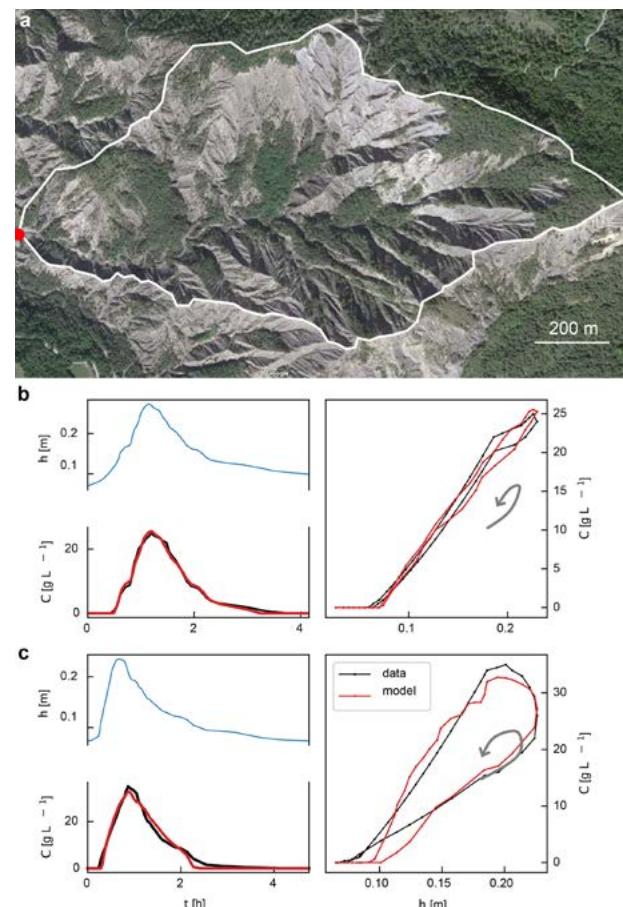
#1

Modèle phénoménologique du transport sédimentaire en suspension dans les petits bassins versants tropicaux et alpins

Phenomenological Model of Suspended Sediment Transport in Small Tropical and Alpine Catchments

Le transport des sédiments par une rivière est conditionné par leur taille : les plus gros, comme les galets, sont entraînés par charriage, roulant et rebondissant sur le lit de la rivière. Les sédiments fins, tels que les limons et les argiles, demeurent en suspension dans la colonne d'eau sous l'effet de la turbulence de l'écoulement. Cette charge en suspension, comprenant non seulement des sédiments mais également des nutriments et des contaminants, a un impact significatif sur la qualité de l'eau et les écosystèmes fluviaux. Pour comprendre et évaluer cette charge, un modèle phénoménologique

The transport of sediment by a river depends on their size: the larger ones, such as pebbles, are carried by traction, rolling and bouncing along the riverbed. Fine sediments, like silts and clays, remain suspended in the water column due to the turbulence of the flow. This suspended load, which includes not only sediments but also nutrients and contaminants, significantly affects water quality and river habitats. To understand and assess this load, a phenomenological model was

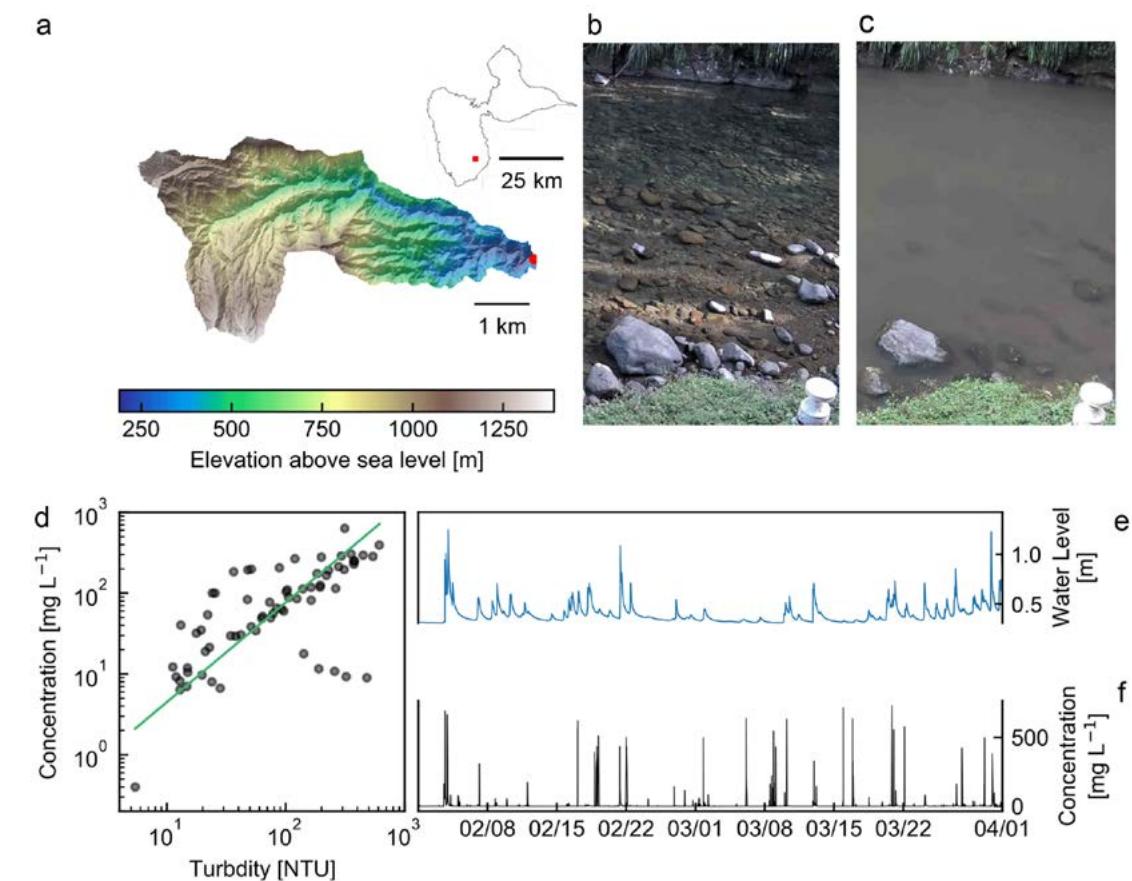


Crues dans le bassin versant du Draix-Laval. (a) Vue aérienne et limites du bassin versant ; le point rouge localise l'exutoire où se trouve la station de Laval. (b, c) Deux inondations enregistrées le 29 juin 2016, de 6h à 11h (b) et de 15h à 20h (c) - heures locales. Panneaux de gauche : séries temporelles du niveau d'eau (ligne bleue) et de la concentration de sédiments en suspension (ligne noire) mesurées à la station de jaugeage. Panneaux de droite : relation entre la concentration et le niveau d'eau. Les flèches grises indiquent la direction des boucles d'hystéresis. Sur chaque panneau, la ligne rouge représente la concentration prédicta par le modèle le mieux ajusté.

Floods in the Draix-Laval catchment. (a) Aerial view and boundaries of the catchment; the red point locates the outlet where the Laval station is located (b, c) Two floods recorded on June 29, 2016, respectively from 06:00 to 11:00 LT and from 15:00 to 20:00 LT. Left panels: time series of water level (blue line) and suspended sediment concentration (black line) measured at the gauging station. Right panels: relationship between concentration and water level. Gray arrows indicate the direction of hysteresis loops. On each panel, the red line represents the concentration predicted by the best-fitted model.

a été élaboré à partir de données collectées dans la rivière Capesterre en Guadeloupe par l'Observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles (ObsERA). Malgré sa simplicité, ce modèle reproduit fidèlement les observations de terrain et permet de comprendre pourquoi la relation entre la concentration des sédiments et le niveau de l'eau n'est pas linéaire (on parle alors d'hystéresis, ou hystérésis) et forme des cycles dont le sens est inverse à celui des aiguilles d'une montre.

Des tests effectués avec les données d'un petit bassin versant des Alpes françaises démontrent que ce modèle est suffisamment flexible pour être appliqué à différents contextes hydrologiques.



Bassin versant de Capesterre sur l'île de Basse-Terre, Guadeloupe. (a) Carte topographique du bassin versant. Les points rouges localisent l'exutoire. (b, c) Images de la rivière aux stades bas et haut. (d) Concentration de sédiments en suspension en fonction de la turbidité dans la rivière Capesterre. (e) Niveau d'eau et (f) concentration de sédiments en suspension du 1^{er} février au 1^{er} avril 2021.

Watershed of Capesterre on the island of Basse-Terre, Guadeloupe. (a) Topographic map of the watershed. The red points locate the outlet of the watershed. (b, c) Images of the river at low and high stages. (d) Suspended sediment concentration as a function of turbidity in the Capesterre River. (e) Water level and (f) suspended sediment concentration from February 1 to April 1, 2021.

Ref : A. Roque-Bernard, A. Lucas, E. Gayer, P. Allemand, C. Dessert & E. Lajeunesse, **Phenomenological model of suspended sediment transport in a small catchment**, *Earth Surf. Dynam.*, 11, 363–381, DOI : 10.5194/esurf-11-363-2023.

Contacts : lucas@ipgp.fr | lajeunesse@ipgp.fr

developed using data acquired in the Capesterre River in Guadeloupe by the Observatory of Water and Erosion in the Antilles (ObsERA). Despite its simplicity, this model accurately reproduces field data and helps explain why the relationship between sediment concentration and water level is not linear (referred to as hysteresis) and forms cycles whose direction is opposite to that of a clock's hands.

Tests conducted with data from a small watershed in the French Alps demonstrate that this model is versatile enough to be applied in various hydrological contexts.

#2

Contrôle redox du chrome dans les sols rouges de Chine mis en évidence par ses isotopes stables

Redox control of chromium in red soils of China revealed by stable isotopes

Une équipe de chercheurs a exploré comment le chrome interagit avec le sol en Chine du Sud, notamment dans les régions où l'on trouve des nodules¹ de fer-manganèse. Ces derniers contiennent des concentrations beaucoup plus élevées de chrome que dans le sol environnant, et semblent le stocker de manière stable au fil du temps.

En examinant comment le chrome est associé à différents composants du sol, les scientifiques ont découvert qu'il avait tendance à se lier plus fortement aux oxydes de fer, en particulier au sein de ces nodules, suggérant que certaines formes de chrome sont préférentiellement captées lors de la formation de ces nodules.

La composition isotopique des nodules avec des valeurs de $\delta^{53}\text{Cr}$ stables ($0,78 \pm 0,17\text{‰}$) indique que le chrome contenu dans ceux-ci est resté relativement constant au fil du temps, signifiant qu'il provient probablement de processus plus anciens, tels que l'altération des minéraux primaires.

L'équipe a également découvert que des changements dans les conditions redox du sol, particulièrement la quantité d'oxygène présente, affectent la formation de ces nodules et la précipitation des oxydes de fer dans le sol environnant, impactant à son tour la manière dont le chrome se déplace à travers le sol.

Comprendre ces processus est crucial pour utiliser les isotopes stables du chrome et retracer ses sources dans le sol, permettant ainsi de mieux appréhender le comportement de cet élément dans différents environnements.

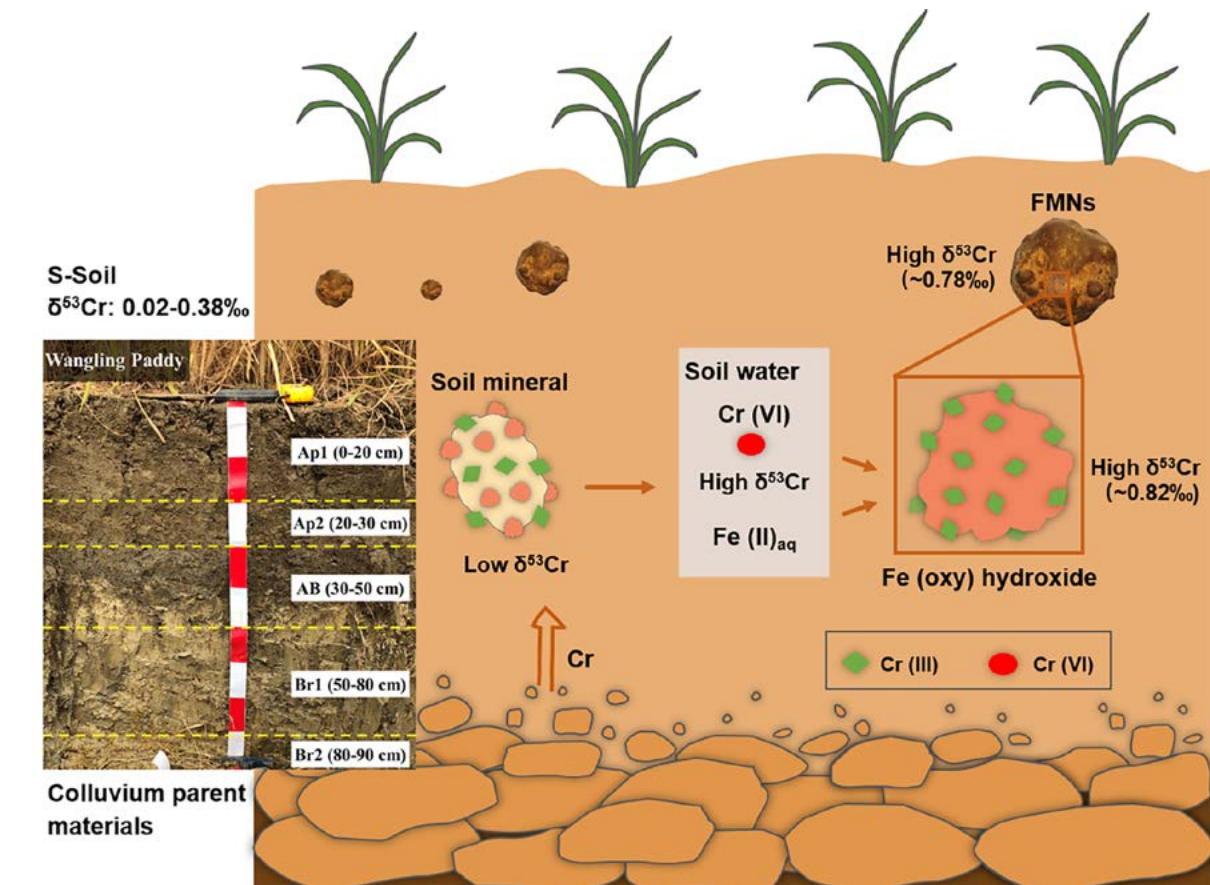
1. Les nodules sont des petites concrétions minérales contenues dans une roche dont elles se différencient par leur composition et/ou leur structure.

A team of researchers investigated the interaction of chromium with soil in Southern China, particularly in regions where iron-manganese nodules¹ are found. These nodules contain significantly higher concentrations of chromium than the surrounding soil and appear to store it stably over time.

By examining how chromium is associated with different soil components, scientists discovered that it tends to bind more strongly to iron oxides, especially within these nodules, suggesting that certain forms of chromium are preferentially captured during the formation of these nodules. The isotopic composition of the nodules with stable $\delta^{53}\text{Cr}$ values ($0.78 \pm 0.17\text{‰}$) indicates that the chromium contained therein has remained relatively constant over time, meaning that it likely originates from older processes, such as the weathering of primary minerals.

The team also found that changes in soil redox conditions, particularly the amount of oxygen present, affect the formation of these nodules and the precipitation of iron oxides in the surrounding soil, thereby impacting how chromium moves through the soil.

Understanding these processes is crucial for utilizing stable chromium isotopes and tracing their sources in the soil, thereby gaining a better understanding of the behavior of this element in different environments.



Les valeurs $\delta^{53}\text{Cr}$ des fractions d'oxydes de fer présentent systématiquement des signatures plus lourdes que les autres fractions, suggérant une séquestration du chrome (VI) isotopiquement lourd pendant la précipitation de l'oxyde de fer. Les fluctuations de l'oxydoréduction du sol, plutôt que l'utilisation des terres, jouent un rôle central dans le contrôle de la précipitation des oxydes de fer dans les sols environnants et dans la formation des oxydes de fer et manganèse, influençant ainsi la mobilité du chrome.

The $\delta^{53}\text{Cr}$ values of iron oxides fractions consistently exhibit heavier signatures than other fractions, suggesting the sequestration of isotopically heavy chromium (VI) during Fe oxide precipitation. Fluctuations in soil's redox, rather than land use, play a pivotal role in controlling the precipitation of Fe oxides in surrounding soils and the formation of iron manganese oxides, thus influencing chromium mobility.

Ref : X. Qin, D. Guinoiseau, Z. Ren, M. F. Benedetti, **Redox control of chromium in the red soils from China evidenced by Cr stable isotopes**, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 465, 133406, DOI : 10.1016/j.jhazmat.2023.133406

Contact : benedetti@ipgp.fr

#3

Vers une meilleure compréhension de l'évolution de la zone critique alpine grâce à la signature isotopique en lithium des sédiments lacustres

Towards a better understanding of the evolution of the Alpine critical zone thanks to the lithium isotope signature of lake sediments

Le concept d'Anthropocène définit la période la plus récente de l'histoire géologique de notre planète, où les humains sont devenus un facteur majeur de l'évolution du système terrestre. Dans ce contexte, il apparaît essentiel de déterminer la chronologie des influences humaines et non humaines sur la dynamique de la zone critique au cours des derniers millénaires. Pour répondre à cette question, une équipe de chercheurs de l'IPGP et du laboratoire EDYTEM (Université Savoie Mont Blanc / CNRS) a combiné l'analyse d'un nouvel enregistrement isotopique du lithium (Li) issu d'une séquence de sédiments préalpins du lac de la Thuile (Alpes françaises), datant d'une période allant du tardiglaciaire¹ à aujourd'hui, et l'étude des sols actuels du bassin versant alimentant ce lac en sédiments. Les résultats suggèrent que les particules de sol sont triées lors de leur formation et de leur acheminement vers le lac, mettant ainsi en évidence l'influence du transport de particules fines sur la signature isotopique du lithium dans les sols et les sédiments lacustres.

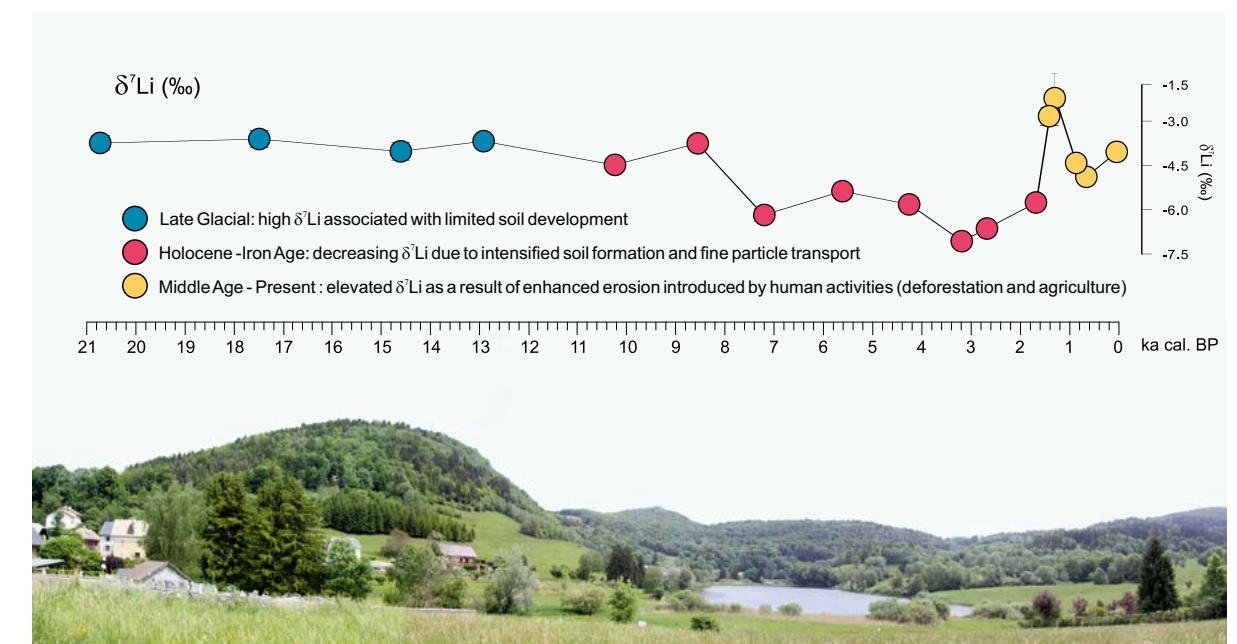
Cette compréhension affinée des processus pédologiques² et du transport sédimentaire permet d'interpréter le paléo-enregistrement lacustre de la Thuile en termes de dynamique passée de la zone critique, d'évolution des sols et de leurs usages. Les auteurs de l'étude en déduisent ainsi que dans ce bassin versant, le développement du sol fut particulièrement limité pendant la période tardiglaciaire, mais qu'il est devenu un processus dominant pendant l'optimum climatique de l'Holocène³, accompagné d'un transport sélectif accru de particules fines. Ces dernières, dotées d'une signature isotopique en lithium particulière, semblent être les seules particules à avoir été transportées dans ces conditions de pédogenèse⁴ active.

Les fortes perturbations provoquées par les activités humaines depuis 3 000 à 4 000 ans cal. AP⁵ ont augmenté le taux d'érosion, entravant ainsi la formation du sol et conduisant au transport indifférencié vers le lac de grains

The concept of the Anthropocene defines the most recent period of Earth history in which humans have become a major driver of Earth system evolution. In this context, it is essential to determine the timing of human and non-human influences on the dynamics of the critical zone over the past millennia. To address this question, a team of researchers from the IPGP and the EDYTEM laboratory (Université Savoie Mont Blanc / CNRS) has combined the analysis of a new lithium (Li) isotope record from a sequence of pre-Alpine sediments from Lake La Thuile (French Alps), dating from the Late Glacial¹ to the present, with a study of current soils in the catchment area that feeds the lake with sediments. The results suggest that soil particles are sorted as they are formed and transported to the lake, highlighting the influence of fine particle transport on the Li isotopic signature of soils and lake sediments.

This improved understanding of pedological processes² and sediment transport means that the palaeo-record of Lake La Thuile can be interpreted in terms of the past dynamics of the critical zone, the evolution of the soils and their use. The authors of the study conclude that in this catchment, soil development was particularly limited during the Late Glacial period, but became a dominant process during the Holocene climatic optimum, accompanied by an increased selective transport of fine particles. These particles, with their particular lithium isotopic signature, appear to be the only ones transported under these conditions of active pedogenesis⁴.

The strong disturbances caused by human activities since 3,000 to 4,000 cal. A.D.⁵ have increased the rate of erosion, hindered soil formation and led to the undifferentiated transport of grains of all sizes towards the lake. After a period of topsoil destruction caused by intense



"Trajectoire" de la zone critique du bassin versant de la Thuile depuis le dernier maximum glaciaire, vue par son enregistrement lacustre des isotopes du lithium. En haut : rapports isotopiques du lithium (rapportés en $\delta^7\text{Li}$) des sédiments détritiques collectés au fond du lac en fonction de l'âge. L'enregistrement est divisé en trois périodes, chacune associée à des valeurs caractéristiques et à des variations de $\delta^7\text{Li}$, qui peuvent être interprétées en termes de processus de transport du sol et des sédiments dans le bassin versant.

The "trajectory" of the critical zone in the La Thuile catchment since the Last Glacial Maximum, as seen from the lithium isotope record of the lake. Top: Lithium isotope ratios (expressed as $\delta^7\text{Li}$) of detrital sediments collected at the bottom of the lake as a function of age. The record is divided into three periods, each associated with characteristic values and variations in $\delta^7\text{Li}$ that can be interpreted in terms of soil and sediment transport processes within the catchment.

de toutes tailles. Après une période de destruction de la couche arable causée par une déforestation et une agriculture intenses, les archives sédimentaires du lac de la Thuile mettent en lumière une évolution des profils pédologiques associée à des changements dans les pratiques agricoles. Cette étude montre que la formation des sols dans cette région des Alpes prend plusieurs millénaires, alors que leur dégradation, qui conduit à des conditions non habitables, peut se faire en seulement quelques siècles. Depuis 500 ans, une pédogenèse active semble avoir repris.

1. Dernière phase du Pléistocène, précédant l'époque actuelle de l'Holocène, de 18 000 à 11 700 ans AP⁵.
2. Processus liés à la formation et l'évolution des sols.
3. Époque géologique s'étendant sur les 12 000 dernières années, toujours en cours.
4. Ensemble des processus physiques, chimiques et biologiques qui, en interaction les uns avec les autres, aboutissent à la formation, la transformation ou la différenciation des sols.
5. Années "Avant le Présent" calibrées = nombre d'années comptées vers le passé à partir du présent, soit avant 1950. Cette datation se basant sur le cycle de vie du carbone 14, la calibration prend en compte les variations du taux de carbone dans l'atmosphère selon une courbe d'étalonnage.

deforestation and agriculture, the sedimentary archives of Lake La Thuile reveal an evolution of soil profiles associated with changes in agricultural practices. This study shows that the formation of soils in this region of the Alps takes several millennia, whereas their degradation, leading to uninhabitable conditions, can occur in just a few centuries. In the last 500 years, active pedogenesis seems to have resumed.

Ref : X. (Y.) Zhang, M. Bajard, J. Bouchez, P. Sabatier, J. Poulenard, F. Arnaud, C. Crouzet, M. Kuessner, M. Dellinger, J. Gaillardet, **Evolution of the alpine Critical Zone since the Last Glacial Period using Li isotopes from lake sediments**, *Earth and Planetary Science Letters*, 624:118463, DOI : 10.1016/j.epsl.2023.118463.

Contact : bouchez@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 aussi bien la dynamique de formation, la composition et l'évolution de ces astres, qu'une éventuelle chimie prébiotique et des conditions environnementales favorables au développement des premiers organismes 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.

Cette édition 2023 du rapport annuel met en lumière des travaux qui revisitent la formation des planétésimaux primordiaux *via* de nouvelles approches isotopiques sur des éléments volatils (Hu *et al.* ; Wang *et al.*), la composition d'atmosphères anciennes au travers des gaz rares piégés dans les inclusions fluides dans des cratères d'impact (Avice *et al.*), ainsi que les mécanismes de stockage du carbone lors des grands orogènes (Thapa *et al.*).

The planets of the Solar System present particularly varied compositions and structures, the origins of which are still widely debated. The study of the primordial processes is essential to understand how they controlled the formation dynamics, composition and evolution of these planets, but also the prebiotic chemistry and the environmental conditions relating to the development of the first living organisms on Earth, and even on other planets and exoplanets. The IPGP is one of the few institutions where scientists from multiple fields of research such as geology, geochemistry, cosmochemistry, geophysics, geobiology and astrophysics can work together to decipher these fundamental questions.

This 2023 edition of the annual report highlights work that revisits the formation of primordial planetesimals *via* new isotopic approaches on volatile elements (Hu *et al.* ; Wang *et al.*), the composition of ancient atmospheres through rare gases trapped in fluid inclusions during impact craters (Avice *et al.*) as well as carbon storage mechanisms during major orogens (Thapa *et al.*).

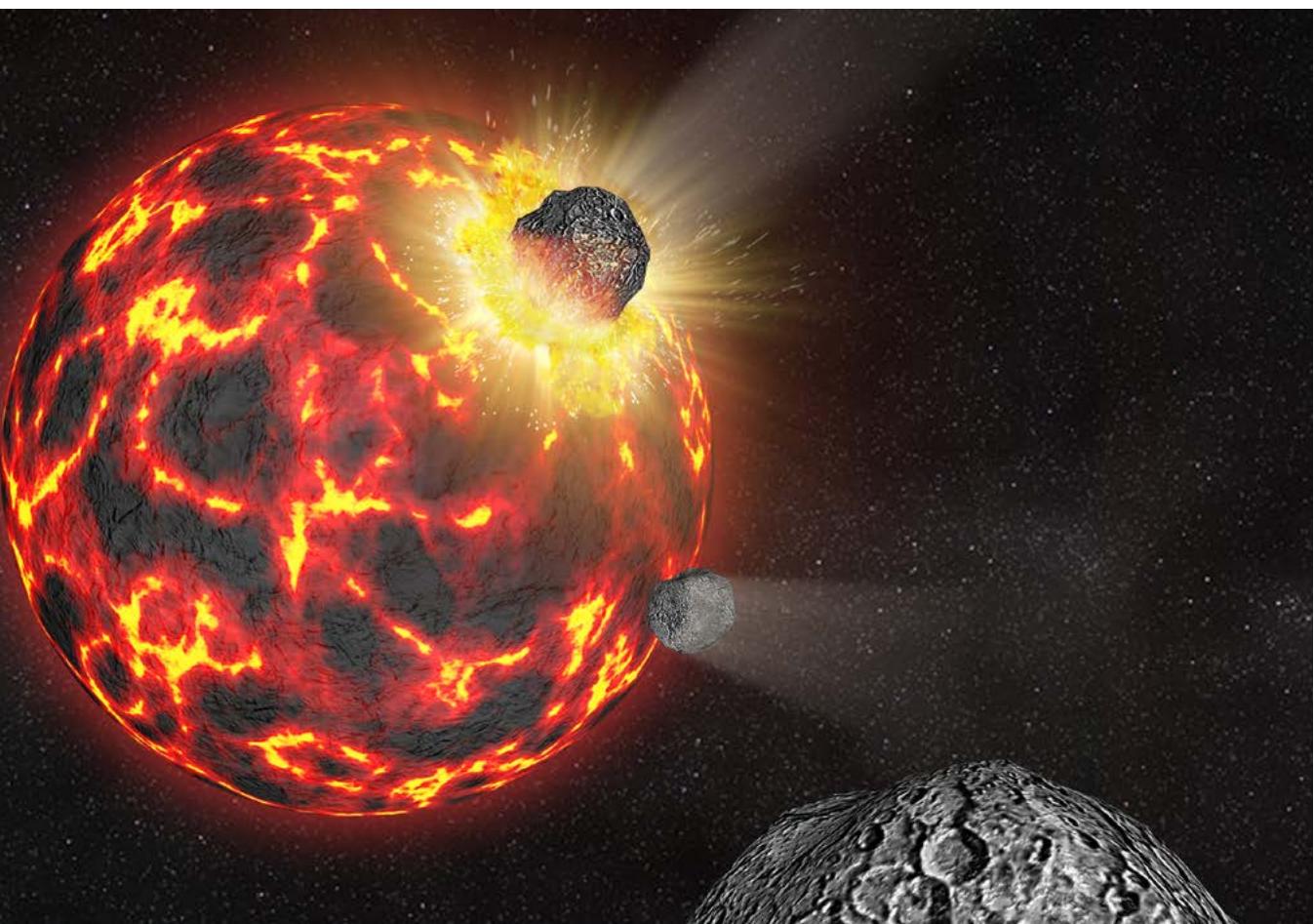
#1

Évaporation et recondensation des volatils dans les planétésimaux

Evaporation and recondensation of volatiles in planetesimals

Il a longtemps été observé que le Système solaire interne, comprenant les planètes telluriques, la Lune et la ceinture d'astéroïdes, présente une composition chimique appauvrie en éléments volatils par rapport à la composition moyenne du Système solaire, mesurée à partir de l'analyse d'échantillons primitifs tels que les chondrites carbonées (CI) de type Ivuna ou les échantillons de Ryugu ramenés par la mission Hayabusa 2.

It has long been observed that the inner Solar System, comprising the terrestrial planets, the Moon, and the asteroid belt, exhibits a chemically depleted composition in volatile elements compared to the average composition of the Solar System, measured from the analysis of primitive samples such as carbonaceous chondrites (CI) like Ivuna or samples from Ryugu brought back by the Hayabusa 2 mission.



Vue d'artiste d'un océan magmatique planétésimal.
Artist's view of a planetesimal magma ocean.

Les récents développements des traceurs isotopiques suggèrent que cet appauvrissement serait lié à la perte par évaporation de ces éléments lors de la formation des premiers corps planétaires, les planétésimaux, qui se sont ensuite assemblés pour former des planètes comme la Terre.

Pour mieux comprendre ce processus, les scientifiques s'intéressent à un type de météorite bien particulier : les angrites. Ces météorites, formées il y a plus de 4,5 milliards d'années, proviennent des planétésimaux les plus appauvris en volatils du Système solaire, et constituent ainsi des échantillons de choix pour l'étude de la formation des planètes rocheuses pauvres en volatils. Cependant, leur teneur exceptionnellement faible en volatils représente un défi analytique majeur que les développements instrumentaux et analytiques commencent juste à relever.

Afin de retracer l'histoire et les mécanismes de cet appauvrissement, une équipe de cosmochimistes de l'IPGP a développé une nouvelle méthode pour analyser avec une très grande précision, grâce au spectromètre de masse à source plasma équipée d'une cellule de collision, les signatures isotopiques de deux éléments alcalins volatils, le potassium et le rubidium. Les échantillons analysés montrent que les angrites sont enrichies en isotopes légers du rubidium (Rb) et du potassium (K). Bien que ce résultat soit à l'opposé de ce qui était attendu et prédit par un modèle de perte par évaporation, les chercheurs proposent que cet enrichissement en isotopes légers reflète un phénomène de recondensation d'une fraction des volatils suite à une évaporation totale ; la cinétique de la réaction privilégiant les isotopes les plus légers.

Ces données indiquent donc que ces planétésimaux primordiaux auraient bien perdu tous leurs volatils par évaporation lors de leur formation, probablement lors d'une phase d'océan magmatique, mais qu'une infime fraction de cette vapeur se serait ensuite recondensée, ouvrant la voie à de nouvelles interprétations de la distribution des éléments volatils au cours des processus de formation planétaire.

Recent developments in isotopic tracers suggest that this depletion may be linked to the loss by evaporation of these elements during the formation of the first planetary bodies, planetesimals, which then assembled to form planets like Earth.

To better understand this process, scientists are focusing on a particular type of meteorite: angrites. These meteorites, formed over 4.5 billion years ago, originate from the most volatile-depleted planetesimals in the Solar System, making them prime samples for studying the formation of volatile-poor rocky planets. However, their exceptionally low volatile content poses a major analytical challenge that instrumental and analytical developments are just beginning to address.

To trace the history and mechanisms of this depletion, a team of cosmochemists from the IPGP has developed a new method to analyze with very high precision, using a plasma-source mass spectrometer equipped with a collision cell, the isotopic signatures of two volatile alkali elements, potassium and rubidium. The analyzed samples show that angrites are enriched in light isotopes of potassium (K) and rubidium (Rb). Although this result is contrary to what was expected and predicted by an evaporation loss model, the researchers propose that this enrichment in light isotopes reflects a recondensation phenomenon of a fraction of the volatiles following total evaporation; the reaction kinetics favoring the lighter isotopes.

These data thus indicate that these primordial planetesimals indeed lost all their volatiles through evaporation during their formation, likely during a phase of magmatic ocean, but that a tiny fraction of this vapor subsequently reconensed, paving the way for new interpretations of the distribution of volatile elements during planetary formation processes.

Ref : B. Wang, F. Moynier, & Y. Hu, **Rubidium isotopic compositions of angrites controlled by extensive evaporation and partial recondensation**, PNAS, Vol. 121, DOI : 10.1073/pnas.2311402121.

Contact : moynier@ipgp.fr

#2

L'évolution de l'atmosphère terrestre étudiée grâce aux cratères d'impact

The evolution of the Earth's atmosphere studied using impact craters

Suivre l'évolution de la composition de l'atmosphère terrestre, c'est étudier l'ensemble de l'histoire géologique de notre planète. Toutefois, les échantillons géologiques ayant piégé des signaux atmosphériques s'avèrent extrêmement rares.

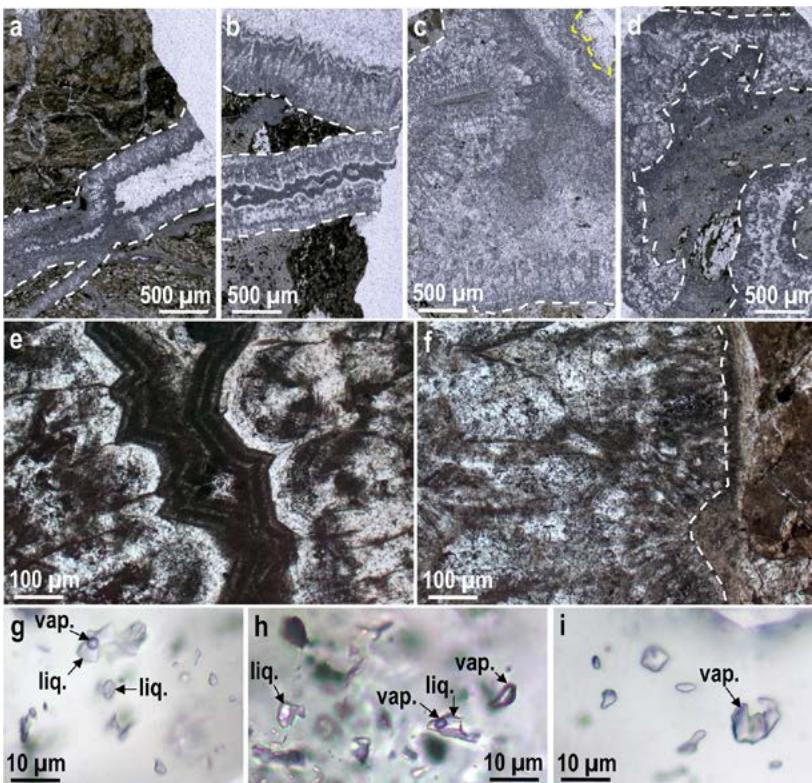
Une équipe internationale menée par Guillaume Avice, chercheur CNRS à l'IPGP, démontre que des roches provenant du système hydrothermal formé suite à l'impact d'astéroïde de Rochechouart (France), il y a environ 200 millions d'années, contiennent des traces de l'atmosphère de cette période de l'histoire de la Terre.

Les compositions élémentaires et isotopiques des gaz rares mesurées révèlent un signal atmosphérique

Tracking the evolution of the composition of the Earth's atmosphere allows following the entire geological history of our planet. However, geological samples that have trapped atmospheric signals are extremely rare.

An international team led by Guillaume Avice, CNRS researcher at the IPGP, shows that rocks from the hydrothermal system formed following the Rochechouart asteroid impact (France) some 200 Ma ago contain traces of the atmosphere from that period of Earth's history.

Measurements of the elemental and isotopic composition of noble gases show that the atmospheric signal is



Inclusions fluides contenues dans les échantillons de Rochechouart. Certaines contiennent une phase liquide (liq.) et une phase gazeuse sous forme de bulle (vap.). La plus grosse inclusion fait vingt micromètres de large. Fluid inclusions contained in the Rochechouart samples. Some contain a liquid phase (liq.) and a gaseous phase in the form of a bubble (vap.). The largest inclusion is twenty micromètres wide.

quasiment pur, dont l'âge est confirmé par la méthode de datation argon-argon.

Les cratères d'impact sont donc de nouvelles cibles pour étudier l'évolution de l'atmosphère de la Terre sur le long terme, conduisant ainsi à mieux comprendre les variations futures et en particulier les changements climatiques.

essentially pure, and Argon-Argon dating confirms the age of this atmospheric signal.

Impact craters are therefore new targets for understanding the evolution of the Earth's atmosphere over the long term, bearing in mind that a better knowledge of the past atmosphere is important for understanding future variations, particularly in the case of climate change.



Nodule d'agate (concrétion de couches de silice) formé par la circulation de fluides dans le cratère de Rochechouart. Barre rouge = 1 cm. Agate nodule (concretion of silica layers) formed by the circulation of fluids in the Rochechouart crater. Red bar = 1 cm.

Ref : G. Avice, M.A. Kendrick, A. Richard, L. Ferrière, **Ancient atmospheric noble gases preserved in post-impact hydrothermal minerals of the 200 Ma-old Rochechouart impact structure, France**, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 620, DOI: 10.1016/j.epsl.2023.118351.

Contact : avice@ipgp.fr

#3

Stockage de carbone par l'Himalaya : l'importance du carbone organique dévoilée

Storage of carbon by the Himalaya: the importance of organic carbon unveiled

Alors que les carbonates représentent le principal stockage de carbone inorganique dans les grandes chaînes de montagnes, le carbone organique stocké sous forme de graphite pourrait également contribuer de manière significative. Bien que fondamental pour définir le bilan global de carbone des orogènes tels que l'Himalaya, qui montre également une émission de carbone métamorphique sous forme de dioxyde de carbone (CO_2), l'importance du stockage de graphite reste insuffisamment contrainte.

Une équipe internationale menée par des chercheurs de l'IPGP a analysé extensivement les occurrences de graphite des "schistes noirs" de l'Himalaya du Népal et a estimé la contribution du carbone organique au budget global de carbone.

Les résultats montrent une cohérence significative des conditions de métamorphisme pour les schistes noirs graphitiques au voisinage de la zone du chevauchement

While carbonates represent the major storage of inorganic carbon in large mountain belts, organic carbon stored as graphite may have a substantial contribution. Although fundamental to define the global carbon budget of orogens such as the Himalaya which also exhibits metamorphic carbon release as carbon dioxide (CO_2), the importance of the storage of graphite remains insufficiently constrained.

An international team led by researchers from the IPGP has extensively analyzed graphite occurrences within the so-called black schists in the Nepal Himalaya using numerous well-established and novel techniques, and estimated the contribution of organic carbon to the global carbon budget.

The results show significant coherence of metamorphic conditions for the graphitic black schists in the vicinity of the Main Central Thrust zone from the metric scale to the scale



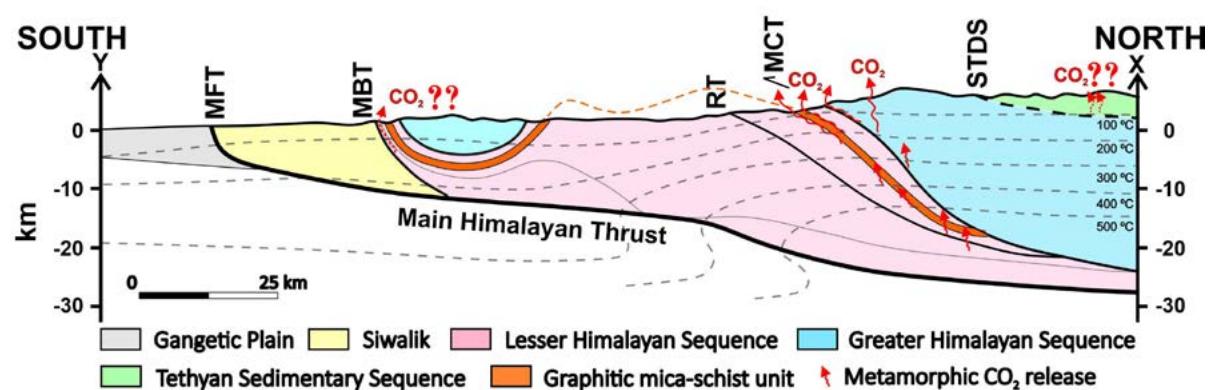
Affleurement de schistes noirs graphitiques dans l'Himalaya du Népal.
Graphitic black schist outcrop in the Nepal Himalaya.

central himalayen de l'échelle métrique à l'échelle d'une portion latérale de l'Himalaya longue de 800 km. Le contenu en carbone organique total (TOC) et la température atteinte par le métamorphisme (peak-T) sont cohérents, suggérant une histoire thermique semblable de ces roches graphitiques.

Les extrapolations de premier ordre révèlent que le carbone organique pourrait représenter jusqu'à 20 % de la quantité totale de carbone stockée par l'Himalaya du Népal. Le graphite est plus stable que les carbonates pendant le métamorphisme prograde (c'est-à-dire lié à une augmentation de température et/ou de pression) et demeure passivement stable, ne s'impliquant dans aucune réaction produisant ou consommant du CO_2 . Un contenu de TOC et un peak-T plus élevés sont observés au Népal Central où l'émission de CO_2 métamorphique actuelle est aussi la plus forte. Les schistes noirs graphitiques apparaissent comme des témoignages remarquables de la dualité puits/source de l'orogénèse himalayenne et de ses effets associés sur le climat de la Terre.

of an 800-km-long lateral portion of the Himalaya. The total organic carbon (TOC) content and the temperature attained by metamorphism (peak-T) are consistent, suggesting a similar thermal history of these graphitic rocks.

First-order extrapolations reveal that organic carbon may represent up to 20 % of the total amount of carbon stored by the Nepal Himalaya. Graphite is more stable than carbonates during prograde metamorphism (i.e. linked to an increase in temperature and/or pressure) and remains passively stable, not involving CO_2 -producing and consuming reactions. Higher TOC content and peak-T are reported in Central Nepal, where the current metamorphic CO_2 emission is also the highest. The graphitic black schists emerge as remarkable signs of the carbon sink/source duality of the Himalayan orogeny and its associated effects on Earth's climate.



Coupe tectonique simplifiée de l'Himalaya du Népal montrant l'unité des schistes noirs graphitiques et les zones d'émissions actuelles de CO_2 métamorphique.

Simplified tectonic cross-section of the Nepal Himalaya showing the graphitic black schist unit and the current metamorphic CO_2 emission zones.

Ref : S. Thapa, F. Girault, D. Deldicque, R. Losno, C. France-Lanord, C. Groppo, F. Rolfo, S. Tamang, T. Rigaudier, B. Debret, K.R. Paudyal, L.B. Adhikari, F. Perrier, **Metric, kilometric and large-scale coherence of metamorphic conditions from graphitic phyllite in the Upper Lesser Himalaya of Nepal: Contribution to the estimation of carbon stored during Himalayan orogeny.** *Chem. Geol.*, 121378, DOI: 10.1016/j.chemgeo.2023.121378.

Contact : girault@ipgp.fr



Retour sur les séismes de l'année avec Robin Lacassin

A look back at the year's earthquakes with Robin Lacassin

L'année 2023 a été marquée par plusieurs séismes d'ampleur aux conséquences catastrophiques, notamment en Turquie et au Maroc. Un lien existe-t-il entre ces tremblements de terre ?

D'un côté, un doublet de séismes, espacés d'une dizaine d'heures, avec une magnitude de Mw¹ 7,8 pour le premier et de 7,6 pour le second, secoue deux branches de la faille est-anatolienne en Turquie ; de l'autre côté, un tremblement de terre d'une magnitude de Mw 6,8 frappe le cœur de la chaîne du Haut Atlas au Maroc. Dans les deux cas, une catastrophe majeure a été constatée, entraînant des milliers de victimes. Les séismes turcs étaient malheureusement relativement "prévisibles", survenant sur l'un des deux principaux systèmes de failles d'un pays fortement sujet aux séismes. Celui du Maroc n'a pas non plus pris la communauté sismo-tectonique au dépourvu : des montagnes dépassant les 4000 m sont le signe d'une activité tectonique et de failles sismogéniques². Espacés d'environ neuf mois et séparés de plus de 4000 km, les séismes turcs et marocains ne sont pas liés physiquement. En revanche, ce n'est pas le cas du doublet turc : les changements de contraintes résultant de la première rupture sur la branche principale de la faille est-anatolienne ont déclenché le second séisme sur la branche secondaire de Sürgü.

Pourquoi ces catastrophes ont-elles causé autant de morts et de destructions ? Les populations connaissaient-elles les risques ?

Il est courant de dire que ce ne sont pas les séismes qui causent les décès, mais les bâtiments ; une manière imagée de distinguer l'aléa - naturel - et ses conséquences, qui dépendent des vulnérabilités - humaines - affectant les populations. En plus des

The year 2023 was marked by several major earthquakes with catastrophic consequences, notably in Turkey and Morocco. Is there a connection between these earthquakes?

On one side, a pair of earthquakes, occurring about ten hours apart, with magnitudes of Mw¹ 7.8 for the first one and 7.6 for the second, shook two branches of the East Anatolian Fault in Turkey; on the other side, an earthquake with a magnitude of Mw 6.8 struck the heart of the High Atlas range in Morocco. In both cases, a major disaster was observed, resulting in thousands of casualties. Unfortunately, the Turkish earthquakes were relatively "predictable", occurring on one of the two main fault systems in a country highly prone to earthquakes. Similarly, the one in Morocco did not catch the seismo-tectonic community off guard: mountains exceeding 4000 m are indicative of active tectonics and seismogenic² faults. Separated by about nine months and over 4000 km apart, the Turkish and Moroccan earthquakes are not physically linked. However, this is not the case with the Turkish pair: stress changes resulting from the first rupture on the main branch of the East Anatolian Fault triggered the second earthquake on the Sürgü secondary branch.

Why did these disasters cause so many deaths and destruction? Were the populations aware of the risks?

It is common to say that it is not the earthquakes that cause deaths, but the buildings; a figurative way to distinguish between the hazard - natural - and its consequences, which depend on the vulnerabilities - human - affecting populations. In addition to

constructions, souvent non conformes aux normes parasismiques, les vulnérabilités sont également socio-économiques. Au Maroc, ce sont les villages traditionnels de l'Atlas, souvent construits en terre crue, qui ont été dévastés. En Turquie, de nombreux bâtiments se sont effondrés comme des châteaux de cartes, par exemple dans la ville d'Antakya, l'ancienne Antioche. Dans les deux cas, les zones touchées sont très vulnérables : éloignement des centres névralgiques du pays, pauvreté, afflux de populations immigrées poussées dans la région par la guerre en Syrie, etc. On peut supposer que dans un pays très sismique comme la Turquie, la perception du risque était tout de même meilleure qu'au Maroc, où les séismes sont moins fréquents. Malgré cela, ce fut un désastre en raison de la vétusté de certains bâtiments, du manque de politiques de réduction des risques par Ankara et de la corruption dans le domaine de la construction. Ceci fut encore exacerbé par les caractéristiques sismologiques des deux séismes turcs qui ont entraîné des accélérations du sol extrêmes : elles ont souvent dépassé 1 g près de la faille.

constructions, often not built to seismic standards, vulnerabilities are also socio-economic. In Morocco, it was the traditional villages of the Atlas Mountains, often built with earthen materials, that were devastated. In Turkey, many buildings collapsed like houses of cards, for example in the city of Antakya, ancient Antioch. In both cases, the affected areas are highly vulnerable: remote from the country's vital centers, poverty, influx of immigrant populations pushed into the region by the war in Syria, etc. It can be assumed that in a highly seismic country like Turkey, the risk perception was still better than in Morocco, where earthquakes are less frequent. Nevertheless, it was a disaster due to the age of some buildings, the lack of risk reduction policies by Ankara, and corruption in the construction sector. This was further exacerbated by the seismological characteristics of the two Turkish earthquakes, which resulted in extreme ground accelerations: they often exceeded 1 g near the fault.



Conséquences du séisme du 6 février 2023 à Antakya, dans la région du Hatay en Turquie.
Consequences of the earthquake of 6 February 2023 in Antakya, in the Hatay region of Turkey.



Conséquences du séisme du 6 février 2023 à Antakya, dans la région du Hatay en Turquie.
Consequences of the earthquake of 6 February 2023 in Antakya, in the Hatay region of Turkey.

Un séisme a également eu lieu en France au mois de juin, en Charente-Maritime. Comment l'expliquer et pourquoi en a-t-on autant entendu parler ?

En effet, le 16 juin 2023, la Charente-Maritime a été secouée par un séisme d'une magnitude de M_L^3 5,3. Sa magnitude de moment M_w est estimée aux alentours de 4,8. Bien moins puissant que ceux enregistrés en Turquie et au Maroc, ce séisme a néanmoins été fortement ressenti par la population, avec des intensités atteignant le niveau VII sur l'échelle macroseismique européenne. Il a causé des dégâts importants, notamment dans les communes de La Laigne et Cram-Chaban, en raison d'un hypocentre très peu profond (environ 3 km) situé dans le socle paléozoïque, sous une couverture sédimentaire de faible épaisseur. Le mécanisme de décrochement au foyer (mouvement horizontal le long d'une faille subverticale) suggère la réactivation d'une faille appartenant au "vieux" système de failles sud-armoricain. Le bilan est sévère, avec environ 5000 constructions endommagées, des dégâts évalués entre 150 et 250 millions d'euros, pour un tremblement de terre survenu dans une région modérément sismique. Ceci explique sa forte médiatisation et met également en lumière le fait que, dans les pays développés, le coût des catastrophes naturelles est davantage économique qu'humain.

1. M_w = magnitude de moment ; représente l'énergie libérée par le séisme.
2. Sismogénique = qui cause des tremblements de terre.
3. M_L = magnitude locale, selon le BCSF-Renass. M_L est déduite de l'amplitude maximale des ondes du séisme à des stations proches et peut être rapidement mesurée. Pour les séismes français, faibles à modérés, M_L est communiquée en premier et c'est elle qui est diffusée par les médias et retenue par le public. Calculer la magnitude de moment, M_w , demande des analyses sismologiques fines et plus longues, surtout pour de tels séismes modérés.

An earthquake also occurred in France in June, in Charente-Maritime. How can this be explained, and why did we hear so much about it?

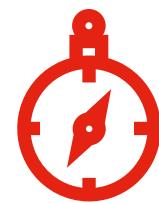
Indeed, on June 16, 2023, Charente-Maritime was shaken by an earthquake with a magnitude of M_L^3 5,3. Its moment magnitude M_w is estimated to be around 4,8. Much less powerful than those recorded in Turkey and Morocco, this earthquake was nevertheless strongly felt by the population, with intensities reaching level VII on the European macroseismic scale. It caused significant damage, particularly in the municipalities of La Laigne and Cram-Chaban, due to a very shallow hypocenter (about 3 km) located in the Paleozoic basement, under a thin sedimentary cover. The mechanism of strike-slip at the focal point (horizontal movement along a subvertical fault) suggests the reactivation of a fault belonging to the "old" southern Armorican fault system. The toll is severe, with approximately 5,000 damaged buildings, damages estimated between 150 and 250 million euros, for an earthquake that occurred in a moderately seismic region. This explains its extensive media coverage and also highlights the fact that, in developed countries, the cost of natural disasters is more economic than human.

1. M_w = moment magnitude; represents the energy released by the earthquake.
2. Seismogenic = causing earthquakes.

3. M_L = local magnitude, according to BCSF-Renass. M_L is derived from the maximum amplitude of seismic waves at nearby stations and can be quickly measured. For French earthquakes, which are weak to moderate, M_L is reported first and is the magnitude communicated by the media and retained by the public. Calculating moment magnitude, M_w , requires detailed and longer seismological analyses, especially for such moderate earthquakes.



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 onze observatoires en collaboration avec des institutions françaises et internationales : l'observatoire magnétique national de Chambon-la-Forêt et ceux de Dalat (Vietnam), Île de Paques (Chili), Edéa (Cameroun), Kourou (Guyane), La Réunion, Sop/Niakhar (Sénégal), Phu Thuy (Vietnam), Pamatai (French Polynesia), Tamanrasset (Algérie) et Borok (Russie - currently not operational). 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.

The Magnetic Observatories Division of the IPGP provides ground-based observations of the Earth's magnetic field and derived products. It is part of the Central Bureau of Terrestrial Magnetism (BCMT), a National Observatory (SNO) of the CNRS-INSU managed by the IPGP. The EOST Magnetic Observatory in Strasbourg also contributes to the BCMT. The IPGP manages the French networks of variation and repetition stations and eleven observatories in collaboration with French and international institutions: The National Magnetic Observatory of Chambon-la-Forêt and those of Dalat (Vietnam), Easter Island (Chile), Edéa (Cameroon), Kourou (French Guiana), Reunion Island, Sop/Niakhar (Senegal), Phu Thuy (Vietnam), Pamatai (French Polynesia), Tamanrasset (Algérie) and Borok (Russia - currently not operational). Most are part of the international INTERMAGNET network. The observatories are operated by specially trained observers who carry out weekly calibration measurements. The observations made are both highly accurate and very stable over the long term. The observatories provide real-time, quasi-definitive and definitive data distributed in the form of seconds, 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 mainly used 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 an orientation reference for industry and as a tool for space weather monitoring.

Activités en 2023 Activities in 2023

■ Approbation du nouveau plan stratégique du BCMT New BCMT strategic plan approved

Le conseil scientifique international du BCMT se réunit tous les deux ans pour évaluer le travail effectué. Le plan stratégique de développement du BCMT pour les années 2024 à 2029 a ainsi été présenté, puis approuvé en juillet avec, en plus des missions historiques, un nouveau projet fortement soutenu : le développement d'un réseau de stations de variations en France. Celles-ci mesurent en permanence le champ magnétique mais, à la différence des observatoires magnétiques, les données ne sont pas calibrées par des mesures manuelles fréquentes. Une telle infrastructure d'observation permet d'étudier les systèmes de courants à l'origine des signaux générés dans l'ionosphère et la magnétosphère, ou ceux induits dans les milieux conducteurs par les variations rapides du champ géomagnétique. Les données recueillies, combinées avec celles des missions satellitaires, deviennent un atout majeur pour l'étude des autres sources du champ géomagnétique. Ce réseau remplacera à terme le réseau de stations de répétition français, dont les levés de mesures ponctuelles étaient effectués tous les deux ans. Le plan stratégique et les recommandations du conseil scientifique sont disponibles sur le site du BCMT.

The BCMT's International Scientific Council meets every two years to evaluate its work. The BCMT's strategic development plan for 2024-2029 was presented and approved in July. In addition to the historic missions, the plan includes a new project strongly supported by the Council: the development of a network of variation stations in France. These stations measure the magnetic field continuously, but unlike magnetic observatories, the data are not calibrated by frequent manual measurements. Such an observing infrastructure makes it possible to study the current systems behind the signals generated in the ionosphere and magnetosphere, or those induced in conducting media by rapid variations in the geomagnetic field. The data collected, combined with that from satellite missions, would be a major asset for the study of other sources of the geomagnetic field. This network will eventually replace the French network of repeat stations, whose spot measurements were carried out every two years. The strategic plan and the recommendations of the Scientific Council are available on the BCMT website.



Observatoire magnétique national de Chambon-la-Forêt, dans le Loiret.
Chambon-la-Forêt National Magnetic Observatory, in the Loiret department.

■ Ouverture de la station de variation à Menez Meur

Opening of the Menez Meur variation station

En collaboration avec le service hydrographique de la Marine (SHOM) pour lequel les données magnétiques sont très utiles, une station de variation a été déployée dans la commune d'Hanvec (29), sur le Domaine de Menez Meur, dans le Parc naturel régional d'Armorique. Installer une station dans cette zone protégée a imposé des contraintes sur l'aspect et la structure de la station, qui ont retardé sa mise en service. Elle est désormais opérationnelle depuis le mois de mai 2023. Les données vectorielles sont collectées toutes les secondes, tandis que les données de référence scalaires le sont toutes les cinq secondes. Elles sont distribuées environ dix minutes après acquisition à cet échantillonnage, et aussi moyennées par minute. Le flux de données a été pratiquement continu depuis le 7 juillet. Ces données sont accessibles sur le portail du BCMT.



Station de variation de Menez Meur, lors d'une mission de réajustement des panneaux solaires pour optimiser la production d'électricité alimentant la station.
Menez Meur variation station, during a mission to readjust the solar panels to optimize the production of electricity supplying the station.

■ Collaborations, visites et accords

Collaborations, visits and agreements

Le site de Chambon-la-Forêt a eu le plaisir d'accueillir Moustafa Bouiflane au mois de juin, un scientifique cherchant à rétablir des sites d'observation magnétique au Maroc ; ainsi qu'Abdenaceur Lemgharbi en fin d'année, qui travaille à l'observatoire de Tamanrasset, exploité par l'IPGP en collaboration avec le Centre de recherche en astronomie, astrophysique et géophysique (CRAAG) en Algérie. Il est venu se former à l'exploitation des données d'observatoires pour la modélisation du champ magnétique principal de la Terre.

The Chambon-la-Forêt site was pleased to welcome Moustafa Bouiflane, a scientist working to re-establish magnetic observatories in Morocco, in June, and Abdenaceur Lemgharbi, who works at the Tamanrasset Observatory, operated by the IPGP in collaboration with the Algerian Astronomy, Astrophysics and Geophysics Research Centre (CRAAG), at the end of the year. He came to learn how to use data from the observatory to model the Earth's main magnetic field.

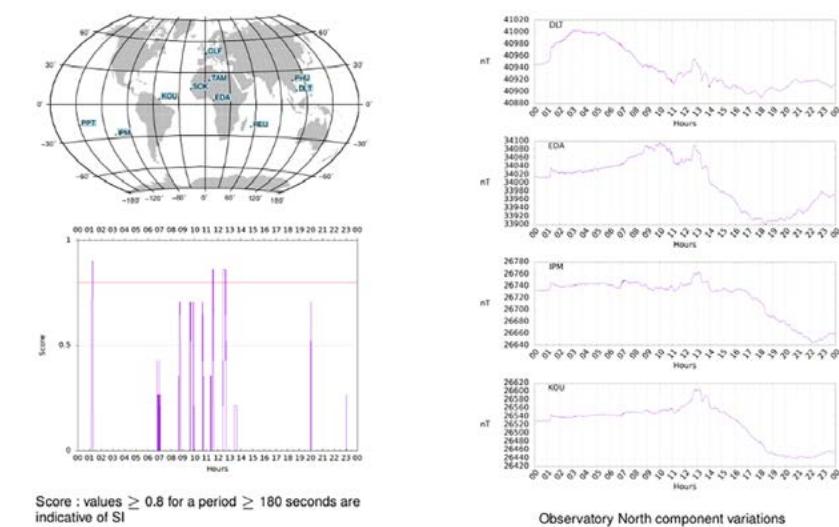
■ Amélioration du système de détection automatique des orages magnétiques

Improvements to the automatic detection system for magnetic storms

Les orages magnétiques sont capables de générer des difficultés pour l'exploitation de nos infrastructures techniques et industrielles. Ils sont précédés d'un signal caractéristique observable dans les données d'observatoires magnétiques et appelé "Début soudain". La mise en place d'un système d'alerte basé sur la détection de ces événements intéressants donc énormément la communauté scientifique, ainsi que certains services de l'état et industriels. Le réseau global des observatoires magnétiques de l'IPGP, qui fournissent des données en temps quasi-réel, permet de les identifier automatiquement avec un taux de réussite élevé. Un algorithme efficace basé sur des "SVM classifiants" (Support Vector Machine Classifiers) a été développé et est maintenant opérationnel. Les alertes, envoyées par mail aux personnes intéressées, comportent une image qui est archivée et mise en ligne sur le portail du BCMT.

Magnetic storms can cause problems in the operation of technical and industrial infrastructures. They are preceded by a characteristic signal that can be observed in magnetic observatory data, known as a "sudden impulse". The implementation of an early warning system based on the detection of these events is therefore of great interest to the scientific community, as well as to government agencies and industry. The IPGP's global network of magnetic observatories, which provide near real-time data, allows these events to be automatically identified with a high success rate. An efficient algorithm based on Support Vector Machine Classifiers (SVM) has been developed and is now operational. The alerts, which are sent by e-mail to interested parties, include an image that is archived and put online on the BCMT portal.

Sudden impulse detected on the 2021-08-27 at 01:12:24 UTC



Message d'alerte généré automatiquement après la détection d'un "Début soudain". Les traces de données magnétiques sont complétées en fin de journée, puis l'image est stockée sur le portail web du BCMT.

Alert message generated automatically after the detection of a "sudden impulse". The magnetic data traces are completed at the end of the day, then the image is uploaded on the BCMT web portal.

■ Journées portes ouvertes à l'observatoire magnétique national

Open days at the National Magnetic Observatory

L'observatoire magnétique national de Chambon-la-Forêt a ouvert ses portes au grand public pour la Fête de la Science les 9 et 10 octobre. Un circuit de visite guidée et différents exposés étaient proposés. Comme lors des précédentes éditions, ces journées ont attiré environ 150 visiteurs.

En savoir plus / Read more:
Portail web du BCMT / BCMT web portal: www.bcmt.fr
Contact : bcmt@ipgp.fr

The National Magnetic Observatory of Chambon-la-Forêt opened its doors to the public for the Science Festival on 9 and 10 October. A guided tour and various presentations were organised. As in previous years, the event attracted around 150 visitors.



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 33 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 23 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 1650 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 33 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 23 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 1,650 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 2023

Activities in 2023

Travaux pour améliorer et entretenir le réseau

Work to improve and maintain the network

- Terres Australes, mars 2023 : en complément de la maintenance des stations sur les îles de Crozet, Amsterdam et Kerguelen - comprenant notamment une recaractérisation des capteurs STS-1 de CRZF (Crozet) et PAF (Kerguelen) - une nouvelle station (STPA) a été mise en place sur l'île de Saint-Paul (proche de celle d'Amsterdam). Cette station n'étant pas télémétrable pour le moment, les membres de l'équipe attendent ses premières données pour évaluer sa qualité.
- SOK station (Sénégal), juillet 2023 : suite à l'installation du capteur en forage à 20 m de profondeur en 2022, des bruits parasites sur les composantes horizontales étaient apparus. La mission de 2023 a permis de comprendre que le bruit venait de l'inondation du puits et d'y remédier en cimentant le fond. Les signaux donnent depuis toute satisfaction.
- Station SANVU (Vanuatu, sud-ouest Pacifique), octobre 2023 : cette station était fragile à cause de problèmes d'énergie et du capteur STS2 qui donnait occasionnellement des signes de faiblesse. Elle possède maintenant deux chaînes d'acquisition complètement séparées (nouveaux capteur T360 et numériseur Q330HR, en parallèle de la chaîne historique du capteur STS2 et du numériseur Q330HR). L'installation solaire et la gestion des télécommunications ont également été complètement revues.
- Southern Territories, March 2023: in addition to maintaining the stations on the islands of Crozet, Amsterdam and Kerguelen - including a re-characterisation of the STS-1 sensors of CRZF (Crozet) and PAF (Kerguelen) - a new station (STPA) has been set up on the island of Saint-Paul (close to Amsterdam). As this station cannot be telemetered for the time being, the team is awaiting its first data to assess its quality.
- SOK station (Senegal), July 2023: following the installation of the borehole sensor at a depth of 20 m in 2022, parasitic noise appeared on the horizontal components. The 2023 mission enabled to understand that the noise was due to the well being flooded and to remedy the situation by cementing the bottom of the well. Since then, the signals have given full satisfaction.
- SANVU station (Vanuatu, south-west Pacific), October 2023: this station was fragile because of power problems and the STS2 sensor, which occasionally showed signs of weakness. It now has two completely separate acquisition chains (new T360 sensor and Q330HR digitizer, in parallel with the historic chain of STS2 sensor and Q330HR digitizer). The solar power system and telecommunications management have also been completely overhauled.



Amélioration des signaux sismologiques à SOK (Sénégal). Vue aérienne du site lors du forage du puits en 2022 (à gauche) et réinstallation du capteur T360 dans le puits de 20 m en juillet 2023 (à droite).



Improving seismological signals at SOK (Senegal). Aerial view of the site when the well was drilled in 2022 (left) and reinstallation of the T360 sensor in the 20 m well in July 2023 (right).



Réinstallation de la station SANVU (Vanuatu) en octobre 2023. Installation du nouveau capteur T360 dans la cave (à gauche) et ajout d'une nouvelle chaîne d'alimentation solaire (à droite).



Reinstallation of the SANVU station (Vanuatu) in October 2023. Installation of the new T360 sensor in the cave (left) and integration of a new solar panel power supply (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 2023, 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 prédecesseurs, 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 T360 de cave installés dans les stations TAM (Algérie) en 2021 et ECH (Alsace) et SANVU (Vanuatu) en 2023, mais également le T360 de puits installé à SOK (Sénégal) en 2023, montrent un excellent fonctionnement, validant ainsi cette évolution.

GEOSCOPE is one of the few networks in the world to provide very broadband data up to periods of 360 seconds and beyond. In 2023, GEOSCOPE continued to acquire new-generation seismometers, with the purchase of two Trillium T360s. These sensors will be installed in the stations most at risk from 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 cave T360s installed at the TAM (Algeria) station in 2021 and at the ECH (Alsace) and SANVU (Vanuatu) stations in 2023, as well as the well T360 installed at SOK (Senegal) in 2023, are working very well, validating this evolution.

■ 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 2022 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 X (anciennement Twitter) de l'observatoire à plus de 5000 abonnés, soit 1000 de plus que l'année passée.

All the available data of year 2022 have been retrieved, verified and transmitted to the IPGP data center. Information on recent earthquakes is shared on the observatory's X account (formerly Twitter) to over 5,000 followers, 1,000 more than last year.

En savoir plus / Read more:

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

Compte X / X Account: [@geoscope_ipgp](https://twitter.com/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

■ Première mission de l'équipe PALAVAS

First mission for the PALAVAS team

À l'échelle des temps géologiques, l'altération chimique des roches silicatées constitue un puits majeur de CO₂ atmosphérique. En particulier, l'altération des îles volcaniques tropicales représente une fraction substantielle de l'absorption globale de CO₂, en raison de la cinétique de dissolution rapide des roches volcaniques, de la chaleur du climat, de l'importance des précipitations orographiques (= pluies causées par l'ascension d'air chaud et humide au-dessus d'un relief terrestre), ou encore des taux d'érosion physique élevés soutenus par des événements extrêmes tels que les cyclones.

Le projet bilatéral franco-allemand ANR/DFG PALAVAS (*Present and past weathering fluxes from tropical volcanic islands*) vise à évaluer l'impact des facteurs lithologiques, hydrologiques, climatiques et humains sur l'altération et l'érosion des îles volcaniques tropicales. En théorie, en l'absence de processus de rajeunissement du paysage par soulèvement tectonique tels que ceux rencontrés au niveau des chaînes de montagne, les taux d'altération des îles volcaniques tropicales, initialement très élevés après la mise en place du champ volcanique, devraient diminuer fortement par la suite.

Dans le but de vérifier cette hypothèse, les chercheurs du projet PALAVAS combinent des analyses de géochimie élémentaire classique et l'utilisation de nouveaux traceurs isotopiques du beryllium et du lithium, afin de mesurer les proportions et l'intensité de cette altération, depuis l'échelle des sols à celle des bassins versants. L'étude des biomarqueurs et la modélisation numérique viennent compléter ces approches, afin de discerner l'effet du climat de celui de l'utilisation des sols sur l'altération.

On a geological timescale, the chemical weathering of silicate rocks is the major sink for atmospheric CO₂. In particular, weathering on tropical volcanic islands accounts for a substantial fraction of global CO₂ uptake, given the rapid dissolution kinetics of volcanic rocks, warm climate, sustained orographic precipitation (= rainfall caused by the ascent of warm, humid air over a land relief), and high physical erosion rates sustained by extreme events such as cyclones.

The bilateral French-German ANR-DFG PALAVAS project (*Present and past weathering fluxes from tropical volcanic islands*) aims to assess the impact of lithological, hydrological, climatic and human factors on the weathering and erosion of tropical volcanic islands.

Theoretically, in the absence of landscape rejuvenation processes by tectonic uplift such as those encountered in mountain ranges, weathering rates on tropical volcanic islands, which are initially very high after the volcanic field is established, should subsequently fall sharply.

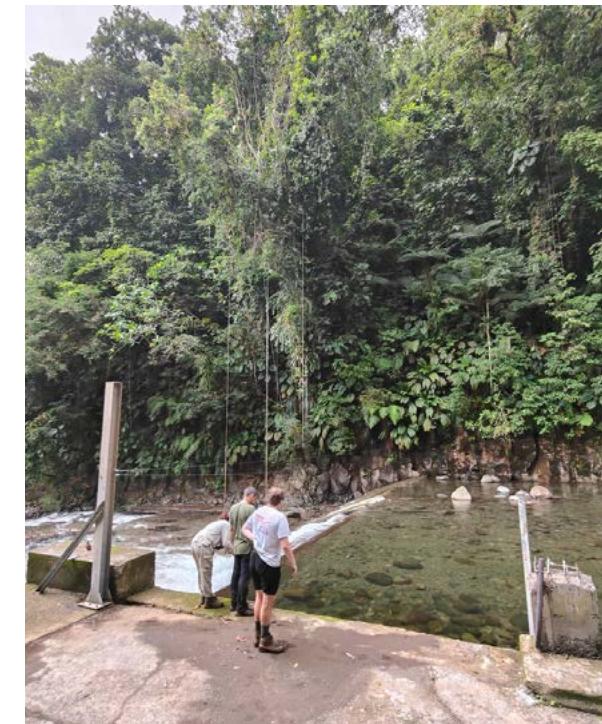
In order to verify this hypothesis, the PALAVAS project researchers are combining classical elemental geochemistry analyses with the use of new beryllium and lithium isotope tracers, in order to measure the proportions and intensity of this alteration, from the scale of soils to that of catchment areas. The study of biomarkers and numerical modelling complement these approaches, in order to discern the effect of climate and land use on weathering.

La première mission de terrain liée au projet s'est tenue du 5 au 17 novembre 2023, impliquant des scientifiques de l'IPGP, de l'EDYTEM (Université Savoie-Mont-Blanc / CNRS), du German Centre for Geosciences de Potsdam et de la Freie Universität Berlin, avec le support d'OBSERA et de l'OVSG-IPGP. Un échantillonnage des sols et des rivières sur des unités de roches d'âges et de types différents a été effectué sur l'île de Basse-Terre, qui permettra d'évaluer la sensibilité des traceurs isotopiques. Des archives sédimentaires terrestres ont également pu être prélevées sur les lacs Flammarion et Grand-Étang, qui donneront l'accès aux flux d'altération et d'érosion des derniers millénaires. Enfin, tout au long du projet, les données hydrologiques et hydrochimiques acquises depuis plus de quinze ans par OBSERA sur les rivières de Guadeloupe aideront à mieux comprendre les flux d'altération et d'érosion modernes et de tester la validité des traceurs isotopiques.



Échantillonnage d'une carotte lacustre à Grand-Étang, Basse-Terre, Novembre 2023.

Sampling of a lake core at Grand-Étang, Basse-Terre, November 2023.



Échantillonnage de la Grande Rivière de Capesterre à "La Digue" (station ObsErA), Basse-Terre, Novembre 2023.

Sampling of the Grande Rivière from Capesterre to "La Digue" (ObsErA station), Basse-Terre, November 2023.

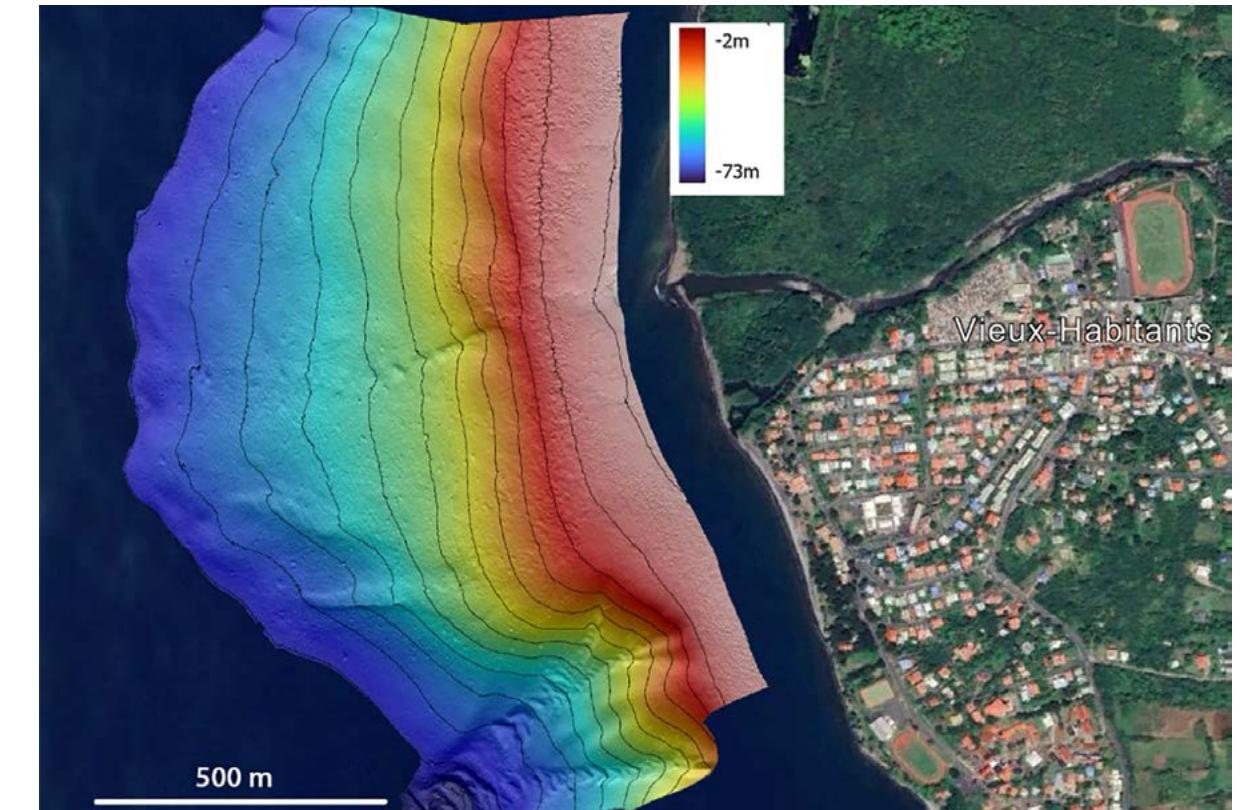
The first field mission linked to the project took place from 5 to 17 November 2023, involving scientists from the IPGP, EDYTEM (Université Savoie-Mont-Blanc / CNRS), the German Centre for Geosciences in Potsdam and the Freie Universität Berlin, with the support of OBSERA and the OVSG-IPGP. Soil and river sampling of rock units of different ages and types has been carried out on the island of Basse-Terre, which will enable the sensitivity of isotopic tracers to be assessed. It has also been possible to collect terrestrial sedimentary archives from lakes Flammarion and Grand-Étang, which will provide access to weathering and erosion flows over the past millennia. Finally, throughout the project, the hydrological and hydrochemical data acquired over more than fifteen years by OBSERA on the rivers of Guadeloupe will help to better understand modern weathering and erosion flows and to test the validity of isotopic tracers.

■ Bathymétrie par sondeur multifaisceaux au large de la rivière de Vieux Habitants

Bathymetry using multibeam echo sounder off the Vieux Habitants river

Une campagne de mesure de la bathymétrie par sondeur multifaisceaux au large de la rivière de Vieux Habitants (Île de Basse Terre, Guadeloupe) s'est déroulée en juin 2023. Suivie par OBSERA depuis 11 ans, cette rivière, qui draine un bassin versant de 15 km environ, transporte lors des crues des galets et des blocs dont les plus grands atteignent plus d'un mètre de diamètre. Cette campagne visait à mesurer la forme et la taille du cône de sédiments accumulés en mer, à l'embouchure de la rivière. En répétant ce type d'opération à intervalles réguliers de quelques années, il sera possible d'estimer la quantité de sédiments rejetés en mer par cette rivière et sa redistribution par les courants océaniques. Ce premier levé bathymétrique, réalisé avec le matériel de la plateforme PREST, a permis de construire une carte des fonds marins d'1 km à une résolution de 0,5 m.

A bathymetry measurement campaign using multibeam echosounder off the coast of the Vieux Habitants river (Basse Terre island, Guadeloupe) took place in June 2023. Monitored by OBSERA for the past 11 years, this river, which drains a catchment area of around 15 km, carries pebbles and blocks during floods, the largest of which reach more than a meter in diameter. The objective of the campaign was to measure the shape and size of the sediment cone accumulated at sea, at the mouth of the river. By repeating this type of operation at regular intervals over several years, it will be possible to estimate the quantity of sediment discharged into the sea by this river and its redistribution by ocean currents. This first bathymetric survey, carried out using equipment from the PREST platform, made it possible to construct a map of the seabed over 1 km at a resolution of 0.5 m.



Carte de la bathymétrie obtenue au large de la rivière de Vieux Habitants qui met en évidence un cône sédimentaire asymétrique associé au bras nord de la rivière. Le bras sud ne semble pas être associé à une topographie particulière. On constate également une forte rugosité visible jusqu'à 10 m de profondeur, probablement due à la présence de blocs redistribués par les tempêtes. La résolution de la carte est de 0,5 m et la surface couverte est de 1 km.

Bathymetry map obtained off the Vieux Habitants river showing an asymmetrical sediment cone associated with the northern arm of the river. The southern arm does not appear to be associated with any particular topography. There is also strong roughness visible down to a depth of 10 m, probably due to the presence of blocks redistributed by storms. The resolution of the map is 0.5 m and the area covered is 1 km.

En savoir plus / Read more: ipgp.fr/obsera



Observatoires volcanologiques et sismologiques

Volcanological and seismological observatories

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

- l'OVSG-IPGP est en charge de la Soufrière de Guadeloupe
- l'OVSM-IPGP est en charge de la Montagne Pelée à la Martinique
- l'OVPF-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, en partenariat avec le CNRS et l'IFREMER

Les quatre structures ont débuté le travail nécessaire à leur intégration au sein de l'infrastructure de recherche Epos-France *via* le service national d'observation en volcanologie (SNOV) du CNRS-INSU, dans la thématique volcanologie.

En novembre 2023 s'est tenue la première assemblée générale du SNOV, sous la responsabilité de l'IPGP et de l'Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand (OPGC - Université Clermont Auvergne), conjointement à une première réunion scientifique sur les volcans français organisée par la section de volcanologie du Comité national français de géophysique et de géodésie de l'IUGG. Ces deux évènements ont rassemblé pendant deux jours une centaine de participants, contribuant ainsi à renforcer l'intégration de la communauté française et à développer des synergies dans la recherche fondamentale et opérationnelle (surveillance) autour des volcans français.

Au cours de l'année, deux réunions du comité d'experts en volcanologie de l'IPGP (CEV) se sont déroulées pour proposer un avis à la direction de l'institut sur les sujets suivants :

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

- the OVSG-IPGP is in charge of the Soufrière in Guadeloupe
- the OVSM-IPGP is in charge of Mount Pelée in Martinique
- the OVPF-IPGP is in charge of the Piton de la Fournaise in Reunion Island
- the Volcanological and seismological monitoring network of Mayotte (REVOSIMA), is a national structure operated by the IPGP and the BRGM in collaboration with the CNRS and the IFREMER

The four organisations have begun the work required to integrate them within the Epos-France research infrastructure through the CNRS-INSU's National service for observation in volcanology (SNOV) in Epos-France volcanology theme.

In November 2023, the first general assembly of the SNOV was held, under the responsibility of the IPGP and the Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand (OPGC - Université Clermont Auvergne), in conjunction with a first scientific meeting on French volcanoes organized by the volcanology section of the French National Committee for Geophysics and Geodesy of the IUGG. These two events brought together around 100 people over 2 days, making a significant contribution to strengthening the integration of the French community and fostering synergies in fundamental and operational research (monitoring) around French volcanoes.

During the year, two meetings of the IPGP's Committee of Experts in Volcanology (CEV) were held to consider the following issues and propose an advice to the IPGP's Director's Office:

- Les indicateurs d'activité volcanique, seuils décisionnels scientifiques, et l'alerte montante scientifique dans le contexte de l'activité de la Soufrière de Guadeloupe et de la Montagne Pelée en Martinique ;
- Réflexion sur une proposition de modification du système de niveaux d'activité volcanique sous la responsabilité de l'IPGP, en lien avec le système de niveaux d'alerte des plans ORSEC volcan, sous l'autorité des préfets ;
- Évaluation de l'évolution de l'activité et de la réactivation de la Soufrière de Guadeloupe et des conditions d'accès dans les zones actives au sommet ;
- Évaluation de l'évolution de l'activité et de la réactivation de la Montagne Pelée en Martinique.

Activités en 2023

Activities in 2023

Le Piton de la Fournaise à la Réunion

The Piton de la Fournaise volcano, Reunion Island

L'année 2023 a été une fois de plus très active au Piton de La Fournaise, avec une intrusion sous le sommet le 21 avril, qui n'a pas entraîné d'activité en surface, suivie d'une éruption de 39 jours du 2 juillet au 10 août, localisée à l'intérieur de la caldeira de l'Enclos Fouqué, une zone inhabitée. Cette éruption, caractérisée par l'ouverture de quatre fissures éruptives sur deux sites différents (flanc est et flanc sud-est) distants de 3,7 km, a émis un volume total de 11,7 millions de mètres cubes.

Pour les équipes de l'OVPF-IPGP, cette activité s'est traduite par :

- 661 heures d'astreintes renforcées (en plus des astreintes H24 habituelles) ; 108 de ces heures ont été assurées avec le soutien de membres de l'IPGP basés à Paris.
- 56 communiqués exceptionnels détaillés d'activité (en plus des bulletins quotidiens semi-automatiques relatifs aux observations de la veille et aux bulletins mensuels). Ces bulletins sont consultables en ligne sur la page internet de l'observatoire.
- 5 VONAs (Volcano Observatory Notice for Aviation) émis auprès du VAAC (Volcanic Ash Advisory Center) de Toulouse et de Londres ainsi qu'à Météo-France.
- 8 alertes en lien avec l'activité volcanique auprès de l'astreinte EMZPCOI (augmentation de sismicité, crises sismiques, début et fin d'un trémor éruptif...), ayant conduit à 6 changements de niveaux d'alerte prévus dans le cadre du dispositif ORSEC "Volcan du Piton de la Fournaise" par le préfet de La Réunion.

En ce qui concerne les réalisations techniques, une nouvelle station entièrement équipée (sismomètre, GNSS, capteur CO₂ NOVAC, inclinomètres, caméra et pluviomètre) a été installée sur le flanc est du volcan pour remplacer celle qui avait été détruite lors de l'éruption d'avril 2020. De plus, une station située à l'extérieur sud de la caldeira de l'Enclos Fouqué a été modernisée avec l'installation d'une nouvelle structure, un sismomètre de nouvelle génération et la pose d'une antenne GNSS, le tout financé par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. Les données de ces deux nouvelles stations permettront un meilleur suivi du magma en profondeur sur les flancs est et sud du volcan.



Éruption de juillet-août 2023 sur le flanc est du Piton de la Fournaise.

Regarding technical achievements, a new fully-equipped station (seismometer, GNSS, CO₂ NOVAC sensor, inclinometers, camera, and rain gauge) was installed on the eastern flank of the volcano to replace the one destroyed during the April 2020 eruption. Additionally, a station located on the southern exterior of the Enclos Fouqué caldera was modernized with the installation of a new structure, a next-generation seismometer, and the placement of a GNSS antenna, all funded by the Ministry of Ecological Transition and Territorial Cohesion. The data from these two new stations will allow for better monitoring of magma deep within the eastern and southern flanks of the volcano.



Maintenance d'une station pendant l'éruption de juillet-août 2023.

Maintenance of a station during the eruption of July-August 2023.

■ 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 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 2023, l'IPGP a organisé deux campagnes en mer pour la surveillance de l'activité sismo-volcanique à Mayotte. Du 29 mars au 1^{er} avril (MAYOBS 24), 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 11 au 28 septembre, une campagne de surveillance (MAYOBS 25) a été menée à bord du navire océanographique Marion Dufresne. Cette mission a notamment permis d'assurer le suivi des émissions de fluides dans la colonne d'eau, d'identifier et localiser de nouveaux sites d'émission de fluide 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 opérationnels les différents réseaux sous-marins de surveillance et leurs capteurs.

Pour la surveillance opérationnelle 24h/24 et 365j/an, une nouvelle station sismique a été installée à Combani. Située dans un environnement peu bruité, elle permettra une meilleure détection, localisation et caractérisation de la sismicité. Par ailleurs, le personnel des observatoires volcanologiques et sismologiques à Paris et de l'OVPF-IPGP a continué de travailler sur le plan ORSEC des risques telluriques à Mayotte, initié par la préfecture.



Installation d'une nouvelle station géophysique à Combani dans le cadre du REVOSIMA.

Installation of a new geophysical station at Combani for the REVOSIMA.

Although the last underwater activity observed at the Fani Maoré volcano dates back to 18 January 2021 during the MAYOBS 17 campaign, local fluid emissions 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 2023, the IPGP organized two sea campaigns to monitor seismo-volcanic activity in Mayotte. From 29 March to 1 April (MAYOBS 24), the TAAF austral patrol vessel Osiris II was used to relieve, maintain and redeploy the ocean bottom seismometers (OBS) that reinforce the onshore seismic network. From 11 to 28 September, a monitoring campaign (MAYOBS 25) was carried out on board the oceanographic vessel Marion Dufresne. The mission involved monitoring fluid emissions into the water column, identifying and locating new fluid emission sites on the ocean bottom in the Fer à Cheval area, taking samples (water, rocks), recovering geophysical data and keeping the various underwater monitoring networks and their sensors operational.

A new seismic station has been installed at Combani for operational monitoring 24 hours a day, 365 days a year. Located in a low-noise environment, it will enable better detection, localization and characterization of seismicity. In addition, staff from the volcanological and seismological observatories in Paris and the OVPF-IPGP continued to work on the ORSEC plan for earthquake risks in Mayotte, initiated by the prefecture.

■ La Soufrière de Guadeloupe**The Soufrière of Guadeloupe**

La Guadeloupe et sa région ont connu en 2023 une activité volcanique et tellurique soutenue : l'OVSG-IPGP a enregistré près de 5000 séismes volcaniques, dont huit essaims sismiques, et 1701 séismes tectoniques, dont plus de la moitié ont pu être localisés (877). La détection et la caractérisation des petits séismes ont été améliorées grâce à l'installation de la station sismique de Grand-Ilet, dans le secteur des Saintes, en décembre 2022, ainsi qu'à l'utilisation du code Phaseworm pour la détection et la localisation automatiques des séismes par "machine learning". Cette activité tellurique a été l'objet de huit communiqués relatifs à la sismicité volcanique et treize communiqués relatifs à des séismes tectoniques ressentis. Les séismes tectoniques les plus importants, fortement ressentis sur le territoire, se sont produits le 20 janvier 2023 à 27 km à l'ouest-nord-ouest de Bouillante, à 184 km de profondeur (M=5,9), puis le 2 décembre à 50 km au nord de La Désirade, à 24 km de profondeur (M=6,0). Le second événement a coïncidé avec un essaim sismique dans le secteur des Saintes du 30 novembre au 2 décembre.

L'activité du volcan de la Soufrière a été marquée par une augmentation très importante de la température des fumerolles, dépassant pour la première fois 200°C au Cratère Sud depuis le début du suivi. Cette augmentation implique un déséquilibre entre le flux de chaleur profond et la quantité d'eau disponible dans le système hydrothermal. Parallèlement, l'activité fumerolienne a continué à s'étendre au sommet et sur les flancs du volcan. Le réseau GNSS a enregistré en 2023 la poursuite de la déformation radiale centrifuge du sommet du volcan, en réponse à la pressurisation globale du système hydrothermal. Ce gonflement semble toutefois ralentir, en accord avec les données d'extensométrie qui révèlent un ralentissement de l'ouverture, voire une tendance à la contraction des grandes failles sommitales. Cette propension à la dépressurisation est accompagnée d'une baisse de 28 % de l'énergie libérée par l'activité microsismique relativement à 2022.

Après une alimentation massive en fluides hydrothermaux profonds début 2022, le niveau du lac Tarissan est resté haut en 2023. Les sources thermales situées en altitude sur le flanc sud de la Soufrière ont poursuivi leur réchauffement débuté il y a plus de 25 ans, témoignant du réchauffement lent mais continu du système hydrothermal de l'édifice. Malgré ces tendances, les signatures des gaz inertes et la sismicité profonde très faible indiquent une stabilité du système magmatique

In 2023, Guadeloupe and its region experienced sustained volcanic and telluric activity: the OVSG-IPGP recorded nearly 5,000 volcanic earthquakes, including eight seismic swarms, and 1,701 tectonic earthquakes, of which more than half could be located (877). The detection and characterisation of small earthquakes has been improved by the installation of the Grand-Ilet seismic station in the Les Saintes area in December 2022, and the use of the Phaseworm code to automatically detect and locate earthquakes using machine learning. This telluric activity was the subject of eight releases relating to volcanic seismicity and thirteen releases relating to felt tectonic earthquakes. The most significant tectonic earthquakes, which were strongly felt in the region, occurred on 20 January 2023 27 km west-north-west of Bouillante, at a depth of 184 km (M=5.9), then on 2 December 50 km north of La Désirade, at a depth of 24 km (M=6.0). The second event coincided with a seismic swarm in the Saintes area from 30 November to 2 December.

The activity of the Soufrière volcano has been marked by a very significant increase in the temperature of the fumeroles, exceeding 200°C for the first time in the South Crater since monitoring began. This increase implies an imbalance between the deep heat flow and the quantity of water available in the hydrothermal system. At the same time, fumarole activity continued to expand at the summit and on the flanks of the volcano. In 2023, the GNSS network recorded the continuation of centrifugal radial deformation at the top of the volcano, in response to the overall pressurisation of the hydrothermal system. However, this swelling seems to be slowing down, in line with the extensometry data, which reveal a slowdown in the opening, or even a trend towards the contraction of the large faults at the summit. This trend towards depressurisation is accompanied by a 28 % drop in the energy released by microseismic activity relative to 2022.

After a massive supply of deep hydrothermal fluids in early 2022, the level of Lake Tarissan remained high in 2023. The thermal springs located high up on the southern flank of the Soufrière continued to warm up, a trend that began more than 25 years ago, showing that the hydrothermal system of the edifice is slowly but steadily warming up. Despite these trends, inert gas signatures and very low deep seismicity indicate that the magmatic system is

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 décidé de mettre à jour l'arrêté réglementant l'accès aux zones actives.

En 2023, l'OVSG-IPGP a poursuivi la fiabilisation, l'extension et la modernisation des réseaux de surveillance. Dans le cadre d'une convention avec le ministère de la Transition écologique, l'observatoire a débuté une 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 Webobs de traitement et visualisation des données a été installée et mise en service. Sur le terrain, le projet d'installation de stations multi-paramètres en forage s'est poursuivi, avec la finalisation des superstructures sur les flancs de la Soufrière, le câblage complet des coffrets d'intégration et le test d'une station complète dans les locaux de l'observatoire. Au niveau du laboratoire de chimie, après plus d'un an d'interruption, l'analyse des gaz non condensables par spectrométrie de masse est à nouveau réalisée en routine, permettant de suivre rapidement la composition des gaz de la Soufrière.

stable at depth. Under these conditions, the volcanic alert level has been maintained at yellow vigilance. However, given the increase in fumarole activity at the summit of the volcano, the Guadeloupe prefecture has decided to update the decree regulating access to active areas.

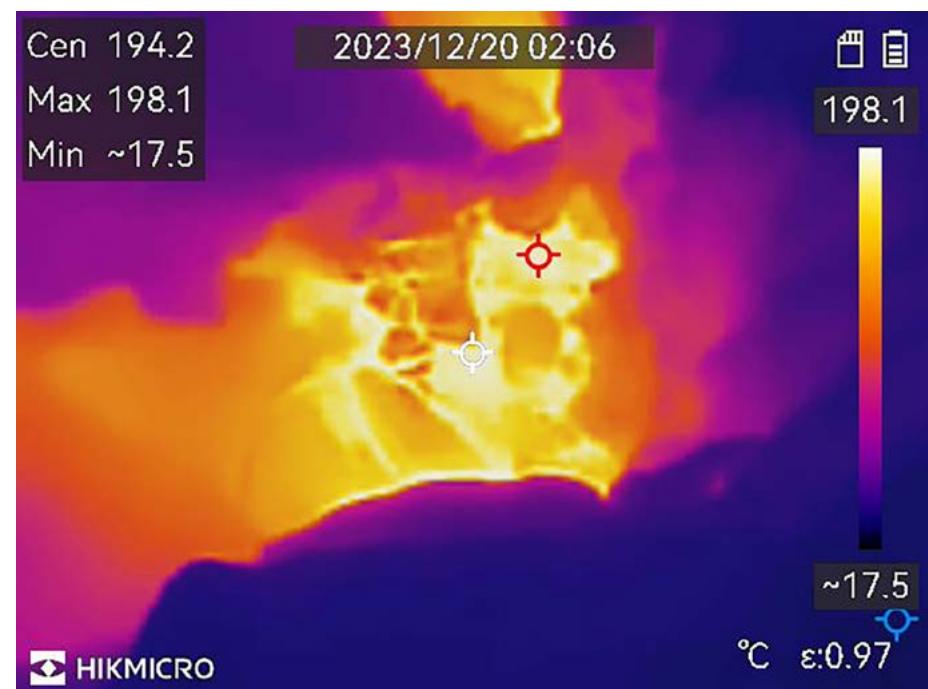
In 2023, the OVSG-IPGP continued to improve the reliability, extension and modernisation of its monitoring networks. As part of an agreement with the French Ministry for Ecological Transition, the observatory began an in-depth upgrade of its computer servers, to improve their reliability and equip itself with modern supervision, backup and assistance tools. The latest version of the Webobs data processing and display software has been installed and commissioned. In the field, the project to install multi-parameter stations in boreholes continued, with the completion of the superstructures on the slopes of the Soufrière, the complete wiring of the integration boxes and the testing of a complete station on the observatory premises. In the chemistry laboratory, after more than a year's interruption, the analysis of non-condensable gases by mass spectrometry is once again being carried out on a routine basis, enabling the composition of Soufrière's gases to be monitored rapidly.



Vue de l'intérieur de la bouche fumerolienne la plus active de la Soufrière (bouche sud de la fissure Cratère Sud), qui révèle la présence de soufre liquide noir à l'intérieur de l'évent, témoignant de températures durablement au-dessus du point de fusion du soufre natif (115 - 120°C). Il s'agit de la première observation de soufre liquide à la Soufrière de Guadeloupe.

View of the interior of the most active fumarole at the Soufrière (south mouth of the South Crater fissure), revealing the presence of black liquid sulphur inside the vent, indicating temperatures that are permanently above the melting point of native sulphur (115 - 120°C). This is the first observation of liquid sulphur at the Soufrière of Guadeloupe.

L'année 2023 aura aussi été marquée par la tempête Philippe et l'ouragan Tammy, au mois d'octobre, qui ont endommagé la station sismique de La Désirade, inondé la cave de la station de Terre-De-Bas aux Saintes et impacté une nouvelle fois la sortie de la source thermale Tarade. Indépendamment de ces catastrophes climatiques, la station BERA d'Anse Bertrand a dû être mise hors service lors des travaux de rénovation de l'hippodrome. De manière générale, un vieillissement de l'ensemble des stations Vsat construites entre 2008 et 2012, en réponse à la mise en place du système d'alerte aux tsunamis dans la Caraïbe, est constaté.



En lien avec la présence de soufre liquide, des températures atteignant 200°C ont été mesurées par sonde et caméra thermique au cours de l'année 2023. Il s'agit des températures les plus élevées mesurées dans les fumerolles de la Soufrière de Guadeloupe.

Linked to the presence of liquid sulphur, temperatures of up to 200°C were measured by probe and thermal camera during 2023. These are the highest temperatures ever measured in the fumaroles of the Soufrière of Guadeloupe.

The year 2023 was also marked by storm Philippe and hurricane Tammy, in October, which damaged the La Désirade seismic station, flooded the cave of the Terre-De-Bas station in Les Saintes and once again impacted the outlet of the Tarade thermal spring. Independently of these climatic disasters, the BERA station at Anse Bertrand had to be taken out of service during renovation work on the racecourse. Generally speaking, all the Vsat stations built between 2008 and 2012, in response to the implementation of the tsunami warning system in the Caribbean, are ageing.

■ La Montagne Pelée à la Martinique

Mount Pelée in Martinique

En Martinique, la sismicité d'origine volcanique de la Montagne Pelée a diminué en 2023 par rapport à l'année précédente, avec 385 séismes enregistrés. Parmi eux, 229 étaient de type volcano-tectonique (VT), cinq étaient de type hybride et 47 étaient de type longue-période. Le séisme VT le plus fort jamais enregistré depuis 1987 a eu lieu le 31 janvier 2023 (Md 2,0), à moins d'un kilomètre de profondeur sous le sommet du volcan. Deux séismes de type hybride et six de type longue-période, de magnitudes Md comprises entre 0,5 et 2, ont été localisés à des profondeurs comprises entre 18 et 30 km sous le niveau de la mer, à proximité ou sous la Montagne Pelée, suggérant une migration de fluides magmatiques au niveau des différents réservoirs de l'édifice volcanique. Toutefois, l'énergie sismique libérée par l'ensemble de ces événements reste faible. L'analyse d'images satellites Sentinel-2 et Planet a permis de suivre l'état de dégradation modérée de plusieurs zones de végétation situées sur le flanc sud-ouest de la Montagne Pelée, en lien avec le dégazage passif du CO₂ du sol. Conformément aux directives des autorités, le niveau d'alerte Jaune (Vigilance) est maintenu.

Par ailleurs, en 2023, 1165 séismes d'origine tectonique ont été enregistrés, dont huit ont été ressentis par la population et ont fait l'objet de communiqués spécifiques. Le plus fort d'entre eux (intensités macrosismiques maximales de IV à V d'après les témoignages internet du BCSF-Rénass, magnitude 5,0) s'est produit le 1^{er} septembre, à environ 49 km au nord-est de Le Vauclin et à environ 54 km de profondeur.

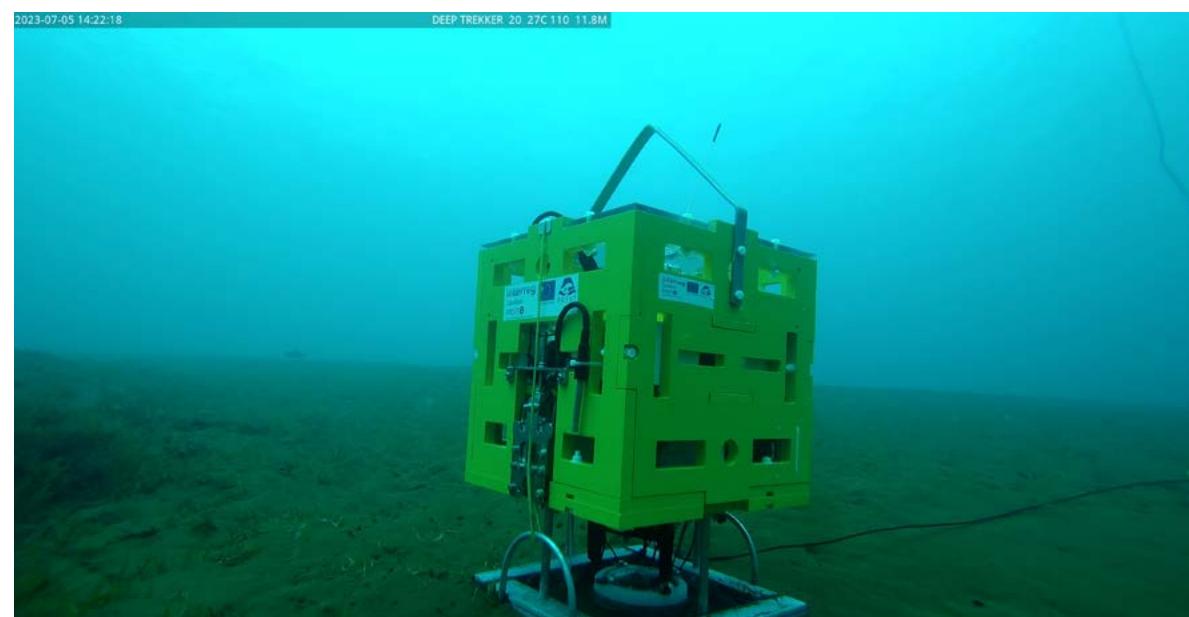
En 2023, le renforcement des réseaux de surveillance de la Montagne Pelée s'est poursuivi : un nouveau capteur GNSS permanent au niveau du flanc nord du volcan est venu compléter le réseau existant, portant à huit le nombre de points de mesure permanents de la déformation. Les trois réseaux denses de huit capteurs sismologiques miniaturisés installés fin 2022 ont fonctionné jusqu'en juillet 2023, puis l'ensemble des équipements ont été redéployés pendant un mois sous la forme d'un réseau de 25 capteurs autour de la caldeira du sommet de la Montagne Pelée. Par ailleurs, le prototype du sismomètre de fond de mer développé durant le projet PREST a été testé avec succès au large du Carbet au mois de juillet.

In Martinique, volcanic seismicity from Mount Pelée decreased in 2023 compared to the previous year, with 385 recorded earthquakes. Among them, 229 were volcano-tectonic (VT), five were hybrid, and 47 were long-period earthquakes. The strongest VT earthquake ever recorded since 1987 occurred on January 31, 2023 (Md 2.0), at a depth of less than one km beneath the volcano's summit. Two hybrid earthquakes and six long-period earthquakes, with magnitudes ranging from Md 0.5 to 2, were located at depths between 18 and 30 km below sea level, near or beneath Mount Pelée, suggesting a migration of magmatic fluids within the volcano's different reservoirs. However, the seismic energy released by all these events remained low. Analysis of Sentinel-2 and Planet satellite images allowed monitoring of the moderate degradation of several vegetation areas located on the southwest flank of Mount Pelée, associated with passive CO₂ degassing from the soil. In accordance with authorities' directives, the Yellow Alert level (Vigilance) is maintained.

Furthermore, in 2023, 1165 tectonic earthquakes were recorded, eight of which were felt by the population and prompted specific announcements. The strongest of these earthquakes (with macroseismic intensities ranging from IV to V according to internet reports from BCSF-Rénass, magnitude 5.0) occurred on September 1, approximately 49 km northeast of Le Vauclin and about 54 km deep.

In 2023, efforts to enhance monitoring networks on Mount Pelée continued. A new permanent GNSS sensor was installed on the volcano's northern flank, expanding the existing network to eight permanent deformation measurement points. The three dense networks of eight miniaturized seismological sensors, deployed at the end of 2022, remained operational until July 2023. Subsequently, all equipment was redeployed for one month as a unified network. Additionally, the prototype ocean bottom seismometer developed during the PREST project underwent successful testing off the coast of Carbet in July.

Le radôme de protection de l'antenne satellitaire de l'OVSM-IPGP a été déménagé sur le site du nouvel observatoire du Morne la Rosette, et les clés de l'ancien observatoire du Morne des Cadets ont été définitivement rendues. Un premier échantillon de gaz a pu être prélevé via la méthode des ampoules de Giggenbach, sur le site de dégazage marin de Saint-Pierre, avec l'aide du Parc Naturel Marin de Martinique. Les premières analyses de l'isotopie de l'hélium contenu dans les gaz dissous de sources chaudes ainsi que dans des gaz sous-marins montrent une signature claire à dominante magmatique profonde et mantellique.



Sismomètre de fond de mer CUBI développé dans le cadre du projet PREST et testé en mer.
CUBI ocean bottom seismometer developed as part of the PREST project and tested at sea.



Prélèvement de bulles de gaz sous-marines sur le site de Périnelle, Saint-Pierre.
Sampling underwater gas bubbles at the Périnelle site, Saint-Pierre.



Radôme de protection de l'antenne satellitaire de l'OVSM-IPGP (boule blanche au fond).
Radome protecting the OVSM-IPGP satellite antenna (white ball in background).

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

La mission principale du Centre de données de l'IPGP (CD-IPGP) est de gérer et distribuer les données produites par les observatoires et les activités de recherche de l'IPGP, afin de soutenir la communauté en sciences de la Terre, tant au niveau national qu'international.

Le CD-IPGP est responsable de l'archivage, du stockage à long terme et de la diffusion des données d'observation et de recherche de l'institut, grâce à des formats et interfaces standardisés. Il assure également l'interconnexion avec des services nationaux (Epos-France, ForM@Ter), européens (EPOS) et mondiaux (FDSN et le Planetary Data System de la NASA). De plus, il est chargé de l'attribution des DOI (Digital Object Identifier) pour les données et produits de données.

Le CD-IPGP gère les données (sismologiques, GNSS, volcanologiques) de sept réseaux d'observation : GEOSCOPE (G), l'observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe (GL), l'observatoire volcanologique et sismologique de Martinique (MQ), l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (PF), le réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (QM), le réseau sismologique français de l'arc des Antilles (WI) et l'observatoire martien InSight (XB 2016-2023).

Fin 2022, le CD-IPGP a implémenté un entrepôt de données pour préserver, diffuser et valoriser les données issues des activités de recherche et d'observation de l'IPGP, en facilitant leur identification et leur citation, tout en respectant les principes "FAIR" (Facile à trouver, Accessible, Interopérable et Réutilisable). L'introduction de ce nouveau service élargit les missions du CD-IPGP, désormais en charge de l'hébergement et de la mise à disposition des données associées aux projets de recherche et aux articles publiés dans des revues à comité de lecture.

L'équipe est constituée de quatre membres (un chercheur et trois ingénieurs qui font partie des réseaux d'ingénieurs d'Epos-France et de ForM@Ter), avec un soutien administratif assuré par deux gestionnaires, et travaille en étroite collaboration avec les observatoires de l'IPGP, la plateforme DANTE/S-CAPAD et le service informatique de l'IPGP.

The main mission of the IPGP Data Center (IPGP-DC) is to manage and distribute the data produced by the IPGP's observatories and research activities, in order to support the Earth sciences community, both nationally and internationally.

The IPGP-DC is responsible for the archiving, long-term storage and distribution of the institute's observation and research data, using standardized formats and interfaces. It also ensures interconnection with national (Epos-France, ForM@Ter), European (EPOS) and global (FDSN and NASA's Planetary Data System) services. It is also responsible for assigning DOIs (Digital Object Identifiers) for data and data products.

The IPGP-DC manages data (seismological, GNSS, volcanological) from seven observation networks: GEOSCOPE (G), the volcanological and seismological observatory of Guadeloupe (GL), the volcanological and seismological observatory of Martinique (MQ), the volcanological observatory of Piton de la Fournaise (PF), the volcanic and seismological monitoring network of Mayotte (QM), the French seismological network of the West Indies (WI) and the InSight Mars observatory (XB 2016-2023).

At the end of 2022, the IPGP-DC implemented a data warehouse to preserve, disseminate and enhance the value of data resulting from the IPGP's research and observation activities, by facilitating their identification and citation, while respecting the "FAIR" principles (Findable, Accessible, Interoperable and Reusable). The introduction of this new service extends the missions of the IPGP-DC, which is now responsible for hosting and making available data associated with research projects and articles published in peer-reviewed journals.

The team is made up of four members (one researcher and three engineers who are part of the Epos-France and ForM@Ter engineering networks), with administrative support provided by two managers, and works closely with the IPGP's observatories, the DANTE/S-CAPAD platform and the IPGP's IT department.

Activités en 2023

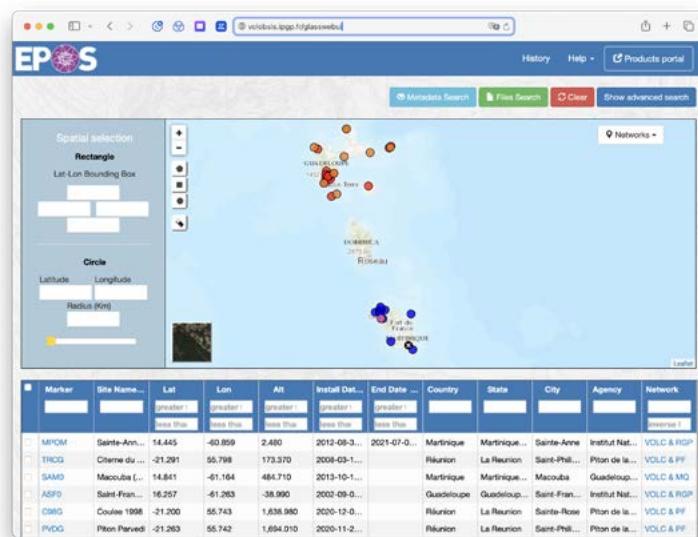
Activities in 2023

Le CD-IPGP s'est engagé dans une démarche de science ouverte à travers trois axes principaux :

- La mise en place de l'entrepôt IPGP Research Collection.
- L'attribution des DOI à diverses données et produits de recherche et d'observation de l'IPGP, comme le catalogue de données de l'Observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles (OBSERA) et l'International Terrestrial Reference Frame (ITRF).
- L'organisation de formations sur les principes FAIR, la science ouverte, les licences des données et l'utilisation de l'entrepôt IPGP Research Collection.

La mise en service de l'IPGP Research Collection a permis d'ouvrir le CD-IPGP à de nouveaux types de données, tels que les données de magnétisme spatial issues de la mission Swarm, les catalogues et modèles martiens provenant de la mission InSight ou encore les catalogues de sismicité consolidés pour l'arc des Antilles.

Enfin, le CD-IPGP a consolidé et mis en production le nœud IPGP-GNSS, composante du GNSS Data Gateway de la plateforme européenne EPOS, afin de distribuer les données GNSS (Global Navigation Satellite System) des observatoires de l'IPGP.



En savoir plus / Read more:

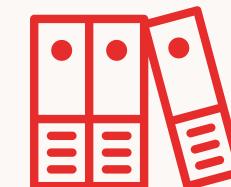
IPGP Research Collection : <https://research-collection.ipgp.fr>

Données GNSS / GNSS Data: <http://volobsis.ipgp.fr/data/access-gnss-data>

GNSS Data Gateway : <https://gnssdata-epos.oca.eu>

Le CD-IPGP en chiffres :

The IPGP-DC in figures:



41 ans de données d'observation disponibles et accessibles via des interfaces standards

41 years of observation data available and accessible via standard interfaces



7 réseaux sismologiques et volcanologiques dont les données sont traitées représentant 197 stations

7 seismological and volcanological networks whose data is processed representing 197 stations



4 réseaux GNSS dont les données sont traitées

4 GNSS networks with processed data



165 stations distribuées en temps réel

165 real-time distributed stations



85 stations GNSS

85 GNSS stations



31 jeux de données dans l'entrepôt

"IPGP Research Collection" en 15 mois d'exploitation

31 datasets in the IPGP Research Collection warehouse in 15 months of operation



19 téraoctets de données et produits

19 datasets in the IPGP Research Collection warehouse



InSight - FSS / InSight - FSS

L'année 2023 a marqué une transition pour la sismologie planétaire à l'IPGP, passant de Mars à la Lune avec la labérialisation de deux services nationaux d'observation : InSight sur Mars jusqu'à l'automne 2024 et FarSide Seismic Suite (FSS) sur la Lune à partir de l'automne 2023. Bien que ces développements aient été significatifs, aucune nouvelle donnée n'a été obtenue. La mission InSight, avec son sismomètre SEIS, a transmis ses dernières données le 13 décembre 2022, soit 1439 jours martiens après le début de la mission. Quant à l'expérience FSS, bien que livrée en 2023 au Jet Propulsion Laboratory (NASA-CALTECH), son lancement vers le bassin d'impact Schrödinger, sur la face cachée de la Lune, est prévu pour le premier semestre 2026.

Ces deux services sont pilotés par l'IPGP en collaboration avec plusieurs laboratoires et observatoires français, notamment le Laboratoire de planétologie et géosciences (LPG) et Géoazur. Pour InSight, l'IPGP est responsable, en partenariat avec le CNES, de SEIS, l'instrument principal de la mission, ainsi que de la validation des données et du Mars SEIS Data Service (MSDS) pour leur diffusion et leur archivage. L'IPGP contribue également aux services Mars Structure et Marsquake pour l'analyse des données et la surveillance de la sismicité martienne. Concernant FSS, l'IPGP est chargé du capteur VBB Z, de la validation des données sismiques, de leur diffusion et archivage via le Centre de données de l'IPGP, ainsi que du développement et de la mise en œuvre du Lunar Quake Service.

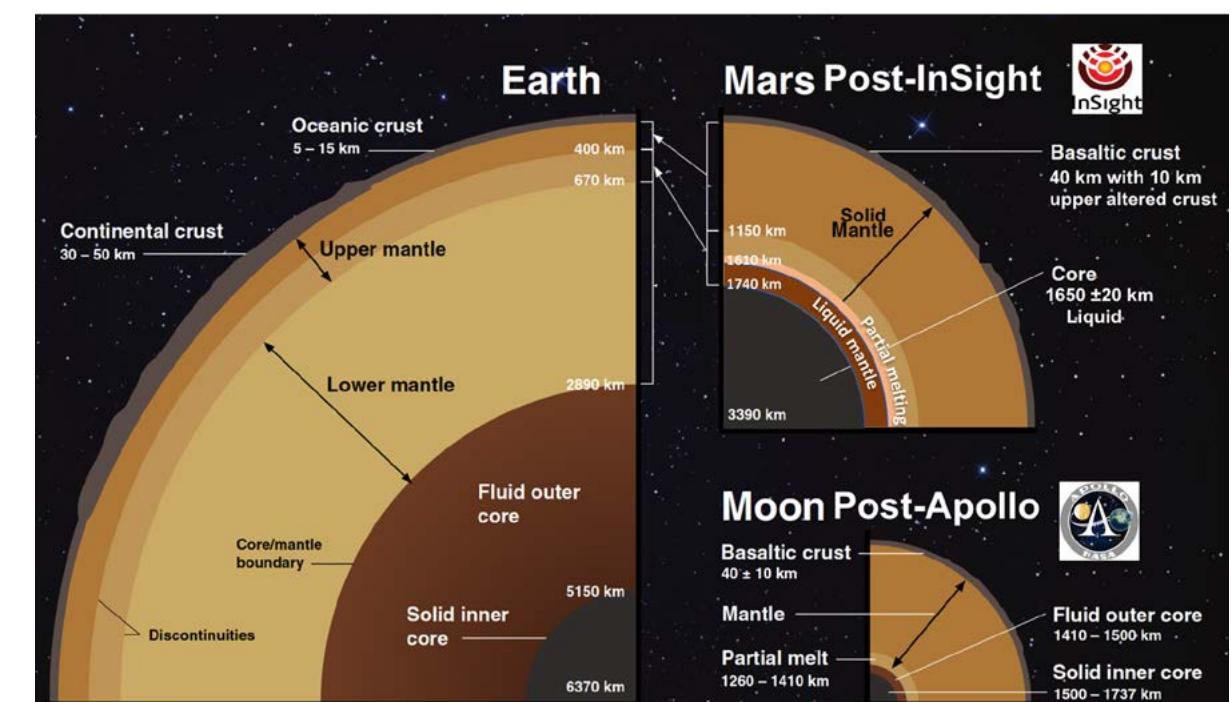
The year 2023 marked a transition for planetary seismology at the IPGP, shifting from Mars to the Moon with the labeling of two national observation services: InSight on Mars until autumn 2024 and FarSide Seismic Suite (FSS) on the Moon starting autumn 2023. While these developments were significant, no new data was obtained. The InSight mission, with its SEIS seismometer, transmitted its final data on December 13, 2022, after 1,439 Martian days since the mission's start. As for the FSS experiment, although delivered to the Jet Propulsion Laboratory (NASA-CALTECH) in 2023, its launch to the Schrödinger impact basin on the far side of the Moon is scheduled for the first half of 2026.

Both services are led by the IPGP in collaboration with several French laboratories and observatories, including the Laboratory of Planetary and Geosciences (LPG) and Géoazur. For InSight, the IPGP, in partnership with the CNES, is responsible for SEIS, the mission's main instrument, as well as data validation and the Mars SEIS Data Service (MSDS) for data dissemination and archiving. The IPGP also contributes to the Mars Structure and Marsquake services for data analysis and monitoring of Martian seismicity. Regarding FSS, the IPGP is responsible for the VBB Z sensor, validation of seismic data, data dissemination and archiving via the IPGP Data Center, and the development and implementation of the Lunar Quake Service.

■ InSight InSight

En 2023, l'équipe SEIS de l'IPGP a contribué à plus de trente articles sur l'analyse des données InSight, avec près de 68 Gbytes de données produites et distribuées internationalement. Sept thèses ont été soutenues en France sur l'analyse de ces données. En particulier, les données du grand séisme du sol 1222, de magnitude 4,7, ont révélé une couche de très faible vitesse dans le premier kilomètre sous la station InSight. De plus, l'équipe a identifié, pour la première fois sur une planète tellurique autre que la Terre, la présence de modes de vibration propres, ainsi qu'une couche mantellique totalement fondu à la base du manteau.

In 2023, the IPGP SEIS team contributed to over thirty articles on InSight data analysis, with nearly 68 GB of data produced and distributed internationally. Seven PhDs were defended in France on the analysis of this data. Notably, data from the significant ground quake on sol 1222, with a magnitude of 4.7, revealed a layer of very low velocity within the first kilometer beneath the InSight station. Additionally, the team identified, for the first time on a terrestrial planet other than Earth, the presence of eigenmodes of vibration, and a completely molten mantle layer at the base of the mantle.



Comparaison des interfaces de la Terre, de la Lune et de Mars mesurées par plus d'un siècle de sismologie sur Terre, par le réseau Apollo sur la Lune et par le sismomètre SEIS de la mission InSight. © Modifié d'après Banerdt et al. (2014) et les nouveaux résultats de Samuel et al. (2023).

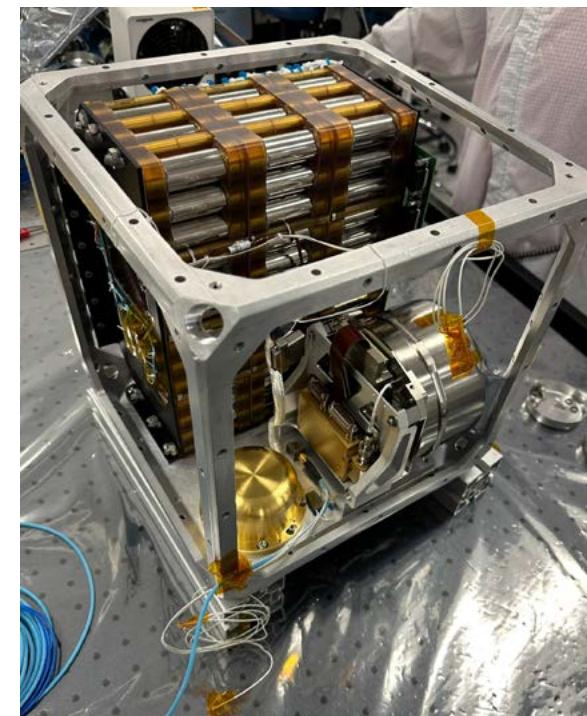
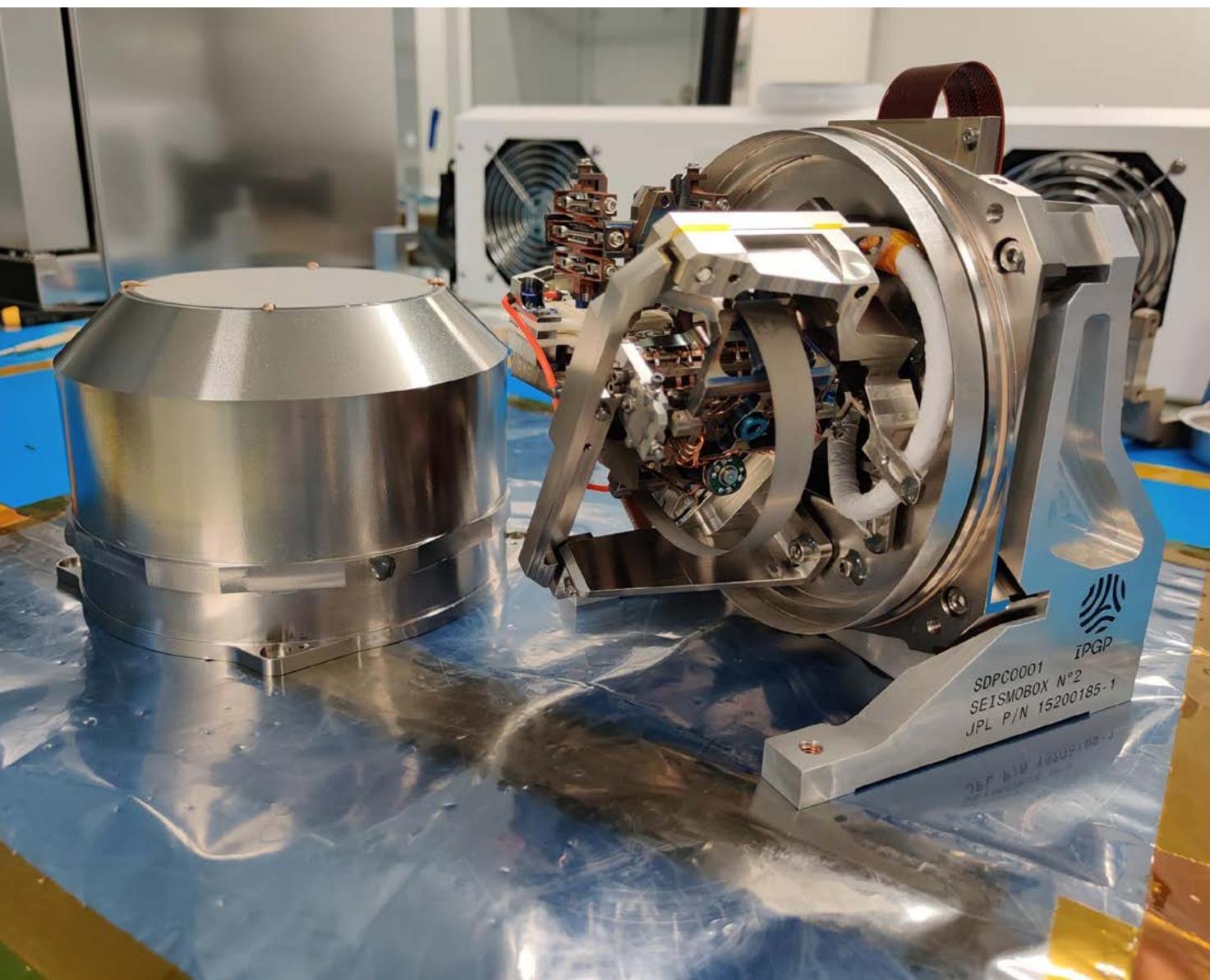
Comparison of the interfaces of Earth, Moon and Mars measured by more than a century of seismology on Earth, by the Apollo network on the Moon and by the SEIS seismometer on the InSight mission. © Modified from Banerdt et al. (2014) and the new results of Samuel et al. (2023).

■ FSS et la nouvelle génération de sismomètre optique LOVBB

FSS and the new generation of optical seismometer LOVBB

L'IPGP a livré le modèle de vol du capteur VBBZ en mars 2023, 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 2023, 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.



Intégration du capteur VBBZ de l'expérience FSS.
FSS's VBBZ integration.

Réseau des observatoires et stations de l'IPGP

Network of the IPGP observatories and stations



IPGP Research Collection

Lancé en novembre 2022, IPGP Research Collection est né du besoin d'archiver et de diffuser les données générées par les observatoires et les missions d'observation de l'IPGP, comme les catalogues sismiques, les relevés bathymétriques ou encore les données de magnétisme spatial.

Reposant sur le logiciel open-source Dataverse, IPGP Research Collection est un entrepôt conçu et administré par le Centre de données de l'IPGP (CD-IPGP) pour préserver, diffuser et valoriser les données et produits de données issus des activités de recherche et d'observation menées à l'institut.

S'inscrivant dans le cadre de la politique de science ouverte, il est conforme aux principes des données FAIR (Facile à trouver, Accessible, Interopérable et Réutilisable), aux critères établis par les revues scientifiques pour la diffusion des données associées aux publications, ainsi qu'aux exigences des organismes de financement en matière de plan de gestion des données.

Comment cela fonctionne ?

L'accès à la publication de données sur cet entrepôt est réservé aux membres de l'IPGP et aux chercheurs associés. Le processus de publication démarre par le téléversement des jeux de données par les utilisateurs, suivi d'une étape de modération.

IPGP Research Collection est structuré en différentes collections :

- Une collection principale dédiée aux données issues des publications scientifiques.
- Une collection spécifique pour chacun des observatoires de l'IPGP.
- Des collections dédiées aux missions d'observations et aux projets de recherche de l'IPGP.

Launched in November 2022, the IPGP Research Collection was created to archive and disseminate data products generated by IPGP's observatories and observation missions, including seismic catalogs, bathymetric surveys, and spatial magnetism data.

Built on the open-source software Dataverse, the IPGP Research Collection is a repository designed and managed by the IPGP Data Center (IPGP-DC). Its purpose is to preserve, disseminate, and enhance the data and data products resulting from research and observation activities conducted at the institute.

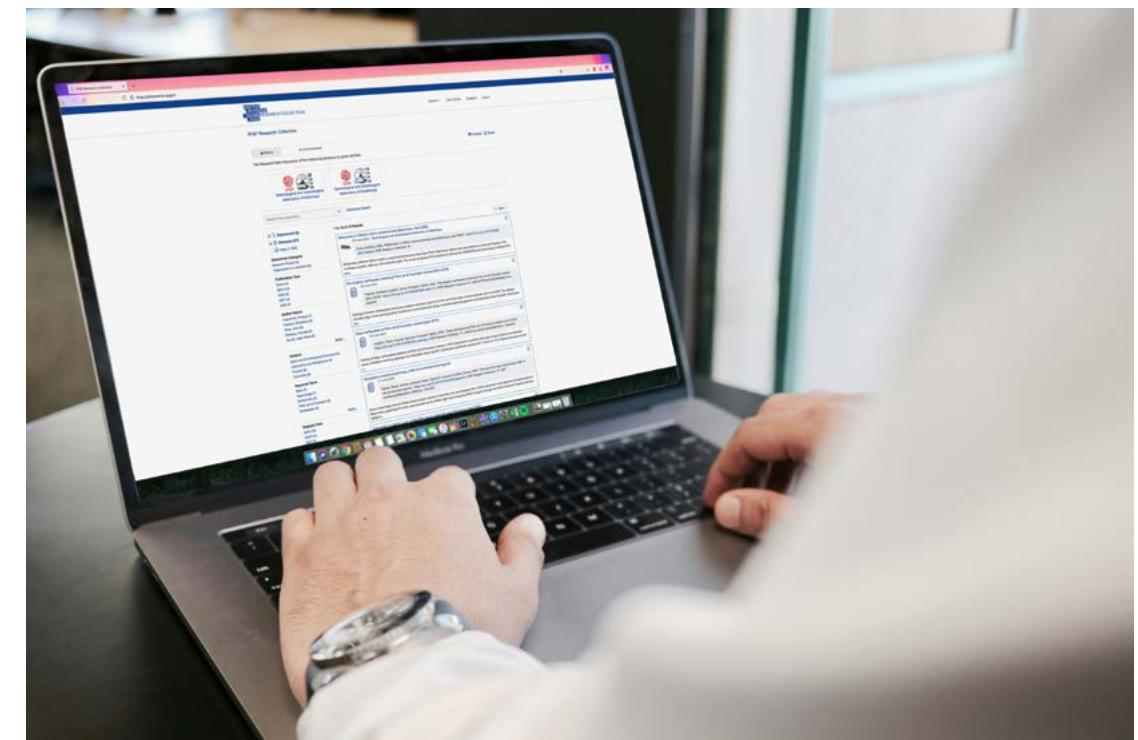
In line with open science policy, it adheres to the FAIR data principles (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable). It meets the standards set by scientific journals for data dissemination associated with publications and complies with the requirements of funding organizations regarding data management plans.

How does it work?

Access to data publication in this repository is reserved for IPGP members and associated researchers. The publication process begins with users uploading datasets, followed by a moderation step.

IPGP Research Collection is structured into different collections:

- A main collection dedicated to data from scientific publications.
- A specific collection for each of the IPGP's observatories.
- Collections dedicated to IPGP's observation missions and research projects.



Page d'accès principale aux jeux de données de l'entrepôt IPGP Research Collection : <https://dataverse.ipgp.fr>.

Main access page to the datasets of the IPGP Research Collection repository: <https://dataverse.ipgp.fr>.

Chaque jeu de données est associé à un identifiant numérique unique (DOI) pour en faciliter la citation et la découverte.

Fin 2023, IPGP Research Collection compte 31 jeux de données répartis en six collections.

Le CD-IPGP organise chaque année des sessions de formation sur les principes FAIR, la science ouverte, les licences des données et l'utilisation de l'entrepôt. Le support pédagogique utilisé lors de ces formations, ainsi qu'une collection de guides et de ressources, sont disponibles sur le site de l'entrepôt.

Each dataset is associated with a unique digital object identifier (DOI) to facilitate citation and discovery.

By the end of 2023, IPGP Research Collection includes 31 datasets spread across six collections.

IPGP-DC organizes annual training sessions on FAIR principles, open science, data licenses, and usage of the repository. The educational material used during these sessions, as well as a collection of guides and resources, are available on the repository website.

En savoir plus / Read more:

Site internet / Website: <https://research-collection.ipgp.fr>

Ressources pédagogiques / Educational resources: <https://research-collection.ipgp.fr/guide>

Contact : rc-support@ipgp.fr



Enseignement Education

En 2023, l'IPGP, à travers sa direction de la formation et des études doctorales (DFED), a financé plusieurs séjours de ses étudiants à l'étranger, dans le cadre de projets scientifiques ou d'initiatives étudiantes.

In 2023, the IPGP, through its Department of Education and Doctoral Studies (DFED), financed several visits abroad by its students as part of scientific projects and student initiatives.

Projet SAFE-M à Madagascar

SAFE-M project in Madagascar

Deux étudiantes en deuxième année de licence CPES, Miryam Poirier et Caroline Lu, ont eu l'opportunité de partir en mission à Madagascar dans le cadre du projet SAFE-M. Coordonné par François Métivier de l'équipe de Dynamique des fluides géologiques de l'IPGP, ce projet vise à aider à la mise en place d'une chaîne de formation professionnelle dans le domaine de l'eau-assainissement-hygiène au standard international à Madagascar. Cette mission de dix jours à l'Université d'Antananarivo était double : produire des interviews de professeurs et d'étudiants afin d'accroître la visibilité du projet et rendre compte des moyens dont disposent les étudiants malgaches à l'université.

Miryam et Caroline ont également travaillé sur la création d'une base de données informatique des anciens étudiants de l'Université d'Antananarivo et du IOGA (Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo), des informations déterminantes pour mieux gérer les actions mises en place par le programme SAFE-M. Elles ont choisi d'intégrer ce projet ambitieux "pour que leurs études soient connectées à des enjeux socio-économiques concrets".

Two second-year CPES bachelor's students, Miryam Poirier and Caroline Lu, had the opportunity to participate in a mission to Madagascar as part of the SAFE-M project. Coordinated by François Métivier from the Geological Fluid Dynamics team at the IPGP, this project aims to establish a vocational training chain in the field of water, sanitation, and hygiene to international standards in Madagascar. This ten-day mission to the University of Antananarivo had a dual purpose: to conduct interviews with professors and students to increase the project's visibility, and to report on the resources available to Malagasy students at the university.

Miryam and Caroline have also been working on the creation of a computer database of former students of the University of Antananarivo and the IOGA (Antananarivo Institute and Observatory of Geophysics). This information is crucial for better management of the initiatives set up by the SAFE-M program. They chose to join this ambitious project "so that their studies would be connected to concrete socio-economic issues".



Miryam Poirier et Caroline Lu devant l'entrée de l'Université d'Antananarivo.

Miryam Poirier and Caroline Lu in front of the entrance to the University of Antananarivo.



Réalisation d'un TP de titrage pour mesurer l'acidité d'une eau par la professeure Nelly Rakoto et ses étudiants en Chimie de l'Environnement.
Professor Nelly Rakoto and her Environmental Chemistry students carried out a practical titration exercise to measure the alkalinity of water.

Séjour sur l'île de Tenerife en Espagne

Stay on the island of Tenerife in Spain

Après avoir effectué un voyage pédagogique sur l'île de La Palma l'année dernière, les étudiants en troisième année de licence ST, menés par Elba Torregrosa Garma et Geoffrey Garcia Da Fonseca, ont souhaité découvrir le plus haut volcan d'Europe, le Teide, sur l'île de Tenerife en Espagne. Ce voyage, conçu par les étudiants eux-mêmes et ouvert à l'ensemble de l'université Paris Cité, s'est déroulé du 25 juin au 2 juillet 2023 et comptait 23 étudiants et deux professeurs. *"Nous avons entrepris cette aventure pour conquérir le Teide et explorer les nombreuses formations volcaniques de Tenerife, une île encore plus ancienne que La Palma."*

Grâce au programme particulièrement varié qu'ils avaient préparé, les étudiants ont pu créer des vlogs (= blogs vidéos) pour l'université, dans le but de partager leurs expériences et les connaissances acquises tout au long de leur périple. Le séjour était notamment composé d'une randonnée aux Roques de Garcia, des formations rocheuses situées à l'intérieur de la caldeira de las Cañadas, ainsi que d'une exploration des tunnels de lave de la Cueva Del Viento. Les étudiants ont également eu la chance de visiter l'observatoire du Teide, géré par l'Institut d'astrophysique des Canaries, où ils ont découvert différents télescopes, dont le Thémis, un télescope solaire français. Dans la zone d'El Médano, ils sont allés admirer

Following an educational trip to the island of La Palma last year, the third-year ST undergraduate students, led by Elba Torregrosa Garma and Geoffrey Garcia Da Fonseca, sought to explore Europe's highest volcano, Mount Teide, on the island of Tenerife in Spain. The trip, organized by the students and open to the entire Université Paris Cité, took place from June 25 to July 2, 2023, involving 23 students and two teachers. *"We undertook this adventure to conquer Teide and explore the many volcanic formations on Tenerife, an island even older than La Palma."*

Thanks to the particularly varied programme they had prepared, the students were able to create vlogs (= video blogs) for the university, aiming to share their experiences and the knowledge gained throughout their trip. The trip included a hike to the Roques de Garcia, rock formations located inside the Las Cañadas caldera, as well as an exploration of the lava tunnels of Cueva del Viento. The students also visited the Teide Observatory, operated by the Canary Islands Institute of Astrophysics, where they learned about various telescopes, including the Thémis, a French solar telescope. In the El Médano area,



les sismites sur la Montaña Roja, des formations géologiques résultant de la liquéfaction du sol engendrée par des séismes passés. Enfin, le voyage s'est conclu par une randonnée à Anaga, dans la "laurisilva", une forêt subtropicale humide très ancienne et endémique des îles Canaries, à la flore et la faune remarquables.

"Ce type de voyage constitue une opportunité exceptionnelle de mettre en pratique nos connaissances théoriques et pouvoir contempler les merveilles de la nature, qu'elles soient géologiques ou biologiques. Cela nous rappelle à quel point il est crucial de les préserver. Nous espérons que d'autres étudiants reprendront notre initiative à l'avenir."

they admired the seismites on Montaña Roja, geological formations resulting from the liquefaction of the ground caused by past earthquakes. Finally, the trip concluded with a hike in Anaga, in the "laurisilva", a very old subtropical rainforest endemic to the Canary Islands, known for its remarkable flora and fauna.

"This type of trip is an exceptional opportunity to put our theoretical knowledge into practice and appreciate the wonders of nature, both geological or biological. It reminds us of the importance of preserving these wonders. We hope that other students will continue our initiative in the future."



Sortie de terrain à Antananarivo avec les étudiants en Master Chimie de l'Environnement pour référencer des puits et analyser les paramètres physico-chimiques de leurs eaux.

Field trip to Antananarivo with Environmental Chemistry Masters students to reference wells and analyse the physico-chemical parameters of their water.

Thèses soutenues

Defended PhDs



24 thèses soutenues en 2023
24 PhDs defended in 2023

Nouvelles thèses

New PhDs



22 nouvelles thèses commencées en 2023
22 new PhDs started in 2023



13 femmes
13 women



13 femmes
13 women



9 doctorants issus du master IPGP
9 PhD candidates from the IPGP Master's degree



10 doctorants étrangers
10 foreign PhD candidates

13 doctorants hors master IPGP
13 PhD candidates outside IPGP

12 doctorants français
12 French PhD candidates



Celia Aranda Reina

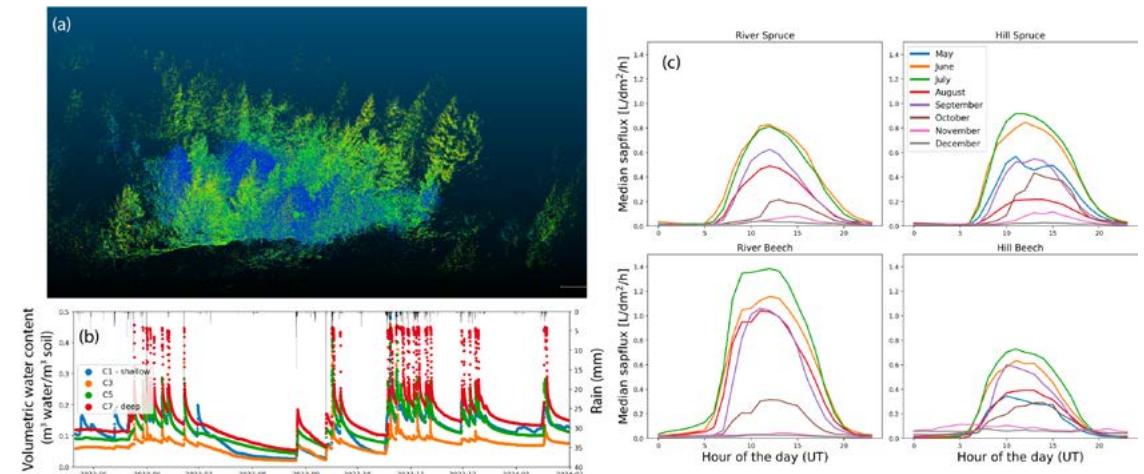
Comment les plantes influencent-elles le transport des solutés dans les rivières ? How do plants influence river solute exports?

Le fonctionnement et l'évolution des écosystèmes forestiers en altitude dépendent des interactions complexes entre l'eau, les sols, le substrat rocheux, les arbres et l'atmosphère. Des disciplines telles que l'hydrologie, la géochimie et l'écologie se sont penchées sur les particularités de chacun de ces composants. Cependant, la somme des parties ne suffit pas toujours à fournir une image complète du fonctionnement d'un écosystème. La question centrale abordée par cette thèse, à savoir comment la végétation influence le cycle de l'eau et des nutriments dans les bassins versants des montagnes méditerranéennes, requiert une approche interdisciplinaire, devenue de plus en plus courante dans les études de la zone critique.

Dans le cadre de cette recherche, quatre bassins versants sur le Mont Lozère, dans les Cévennes, faisant partie du réseau français des observatoires de la zone critique OZCAR, sont étudiés. Bien que ces bassins partagent des caractéristiques similaires

Ecosystem function and evolution in upland watersheds depend on the intricate interactions among water, soil, bedrock, forests, and the atmosphere. Disciplines such as hydrology, geochemistry, and ecology have focused on specific aspects of these compartments individually. However, understanding how these components interact to shape ecosystem dynamics requires a holistic approach, increasingly common in Critical Zone studies.

We investigate four adjacent catchments in Mont Lozère, Les Cévennes, which are part of the French network of Critical Zone Observatories (OZCAR). While these catchments share similar characteristics in



(a) Nuage de points de la forêt de hêtres du bassin versant de la Sapine, Mont Lozère, obtenu à partir des mesures LiDAR utilisées pour calculer les changements de biomasse. (b) Chronologie des précipitations et du volume d'eau à des profondeurs souterraines de 10 (C1), 30 (C3), 50 (C5) et 70 (C7) cm. (c) Flux de sève diurne médian pour chaque mois de 2023 pour les hêtres et les épicéas.

(a) Point cloud of the Sapine watershed (Mont Lozère) beech forest obtained from LiDAR measurements used to calculate changes in biomass. (b) Time series of precipitation and volumetric water content at soil depths of 10 (C1), 30 (C3), 50 (C5) and 70 (C7) cm. (c) Median diurnal sap flux pattern across each month of 2023 for beech and spruce trees.

(substrat rocheux, altitude et climat), la composition de leur couvert forestier varie considérablement, avec des parties couvertes de hêtres, d'épicéas, de sapins ou de prairies, offrant ainsi des sites expérimentaux naturels idéaux pour étudier l'influence du couvert végétal sur les transferts d'eau et de solutés dans la zone critique.

Pour comprendre les interactions entre les plantes et l'eau, d'importantes quantités de données sont analysées, portant sur les précipitations, l'écoulement, le flux de sève et les modèles d'évapotranspiration. Les mesures LiDAR permettent de suivre les variations de biomasse en surface au fil des saisons. Par ailleurs, des échantillons d'eau de pluie et de cours d'eau, collectés à intervalles réguliers et lors d'événements pluvieux ponctuels, sont utilisés pour étudier le recyclage des nutriments des sols et des cours d'eau par les plantes. Ces prélèvements fournissent des informations sur les transports de solutés dans les rivières et alimentent les modèles de transport réactif destinés à évaluer l'impact du changement climatique sur différents processus géochimiques dans la zone critique.

terms of bedrock type, altitude, and meteorological conditions, they exhibit significant differences in forest composition, including areas covered by beech, spruce, fir, or grassland. This variability provides an ideal natural experimental field site.

To unravel the intricate relationship between vegetation and water, we utilize extensive datasets on precipitation, discharge, sap flux measurements, and evapotranspiration models. LiDAR measurements allow us to quantify seasonal changes in above-ground biomass. Additionally, we analyze long-term and event-based stream and rainwater samples to understand how plants cycle nutrients from soils and stream waters, providing insights into solute exports from rivers. Together, these measurements offer a more comprehensive understanding of solute transport by streams and inform reactive transport models designed to assess the impact of climate change on geochemical processes in the critical zone.

Doctorante

Celia Aranda Reina

PhD candidate

reina@ipgp.fr

Directeurs de thèse

Jennifer Druhan & Julien Bouchez

PhD supervisors

bouchez@ipgp.fr



José Grand

Utilisation de la fibre optique comme capteur géophysique – Applications ferroviaires

Using fibre optics as a geophysical sensor - Railway applications

Dans le domaine ferroviaire, la qualité de la plateforme¹ joue un rôle déterminant dans les performances de l'exploitation, notamment en termes de sécurité et d'efficacité. Elle constitue le socle sur lequel repose l'infrastructure, assurant ainsi la stabilité nécessaire au maintien de la géométrie de la voie pour des vitesses d'exploitation optimales. Cette qualité est tributaire des propriétés mécaniques des matériaux utilisés, des procédés associés, mais également des caractéristiques des sols environnants. Bien que maîtrisées lors de la conception, ces caractéristiques peuvent se dégrader au fil du temps sous l'effet des contraintes imposées par le passage des trains, des conditions météorologiques ou encore du changement climatique.

¹ Plateforme ferroviaire = surface supportant toute la superstructure d'une ligne de chemin de fer : ballast, traverses, rails, système d'électrification, mais aussi les divers types de gares, leurs équipements et la signalisation.

In the railway domain, the quality of the platform¹ plays a crucial role in operational performance, particularly in terms of safety and efficiency. It serves as the foundation upon which the infrastructure rests, ensuring the stability necessary to maintain the track geometry for optimal operating speeds. This quality depends on the mechanical properties of the materials used, associated processes, as well as the characteristics of the surrounding soil. Although controlled during design, these features may degrade over time due to stresses imposed by passing trains, weather conditions, or climate change.

¹ Platform = surface supporting the entire superstructure of a railway line: ballast, sleepers, rails, electrification system, as well as the various types of stations, their equipment and signaling.

Pour surveiller ces différents paramètres, le gestionnaire d'infrastructure mobilise une gamme variée de moyens humains, techniques et expérimentaux, nécessitant ainsi une allocation importante de ressources. Afin de simplifier et d'améliorer cette surveillance, un outil prometteur se présente : le DAS (*Distributed Acoustic Sensing - Système de détection acoustique distribuée*), qui permet à un seul interrogateur de collecter des informations sur un câble de 50 à 100 km de long. L'objectif principal de cette thèse est de développer et d'adapter des méthodologies utilisant la technologie DAS et les ondes de surfaces générées par le passage des trains pour surveiller les propriétés mécaniques du sous-sol situé sous les voies.

To monitor these various parameters, infrastructure managers deploy a diverse range of human, technical, and experimental resources, requiring significant resource allocation. To simplify and enhance this monitoring, a promising tool is available: Distributed Acoustic Sensing (DAS), which allows a single interrogator to gather information along a 50 to 100 km cable. The primary objective of this PhD is to develop and adapt methodologies utilizing DAS technology and surface waves generated by passing trains to monitor the mechanical properties of the subsurface beneath the tracks.



Doctorant

José Grand

PhD candidate

grand@ipgp.fr

Directeurs de thèse

Fabian Bonilla & Eléonore Stutzmann

PhD supervisors

stutz@ipgp.fr



Partenariats et relations internationales
Partnerships and international
relationships

■ Lancement de l'Atrium des géosciences

Launch of the Geosciences Atrium

Les chaires industrielles composant l'Atrium des géosciences de l'IPGP sont une action du projet Fire Up de l'université Paris Cité, lauréat du programme ExcellencES France 2030 (PIA 4). L'objectif est de développer des projets de recherche en géosciences, en collaboration avec l'industrie, pour accompagner la transition énergétique et contribuer ainsi à limiter le réchauffement climatique. Les chaires seront mises en œuvre autour de l'utilisation des ressources non fossiles qu'offre le sous-sol (énergie géothermique, hydrogène naturel, métaux critiques...), de manière raisonnée et durable, que ce soit à travers le captage et stockage géologique du CO₂ et de l'H₂, ou via le développement de nouveaux procédés biogéochimiques pour extraire et recycler les métaux critiques. Avec ces chaires, l'IPGP vise à forger des partenariats solides et pérennes financièrement avec des acteurs industriels innovants. Un ingénieur de projet a été recruté, M. David Moreau, qui assistera les lauréats dans leurs recherches de contacts au niveau industriel.

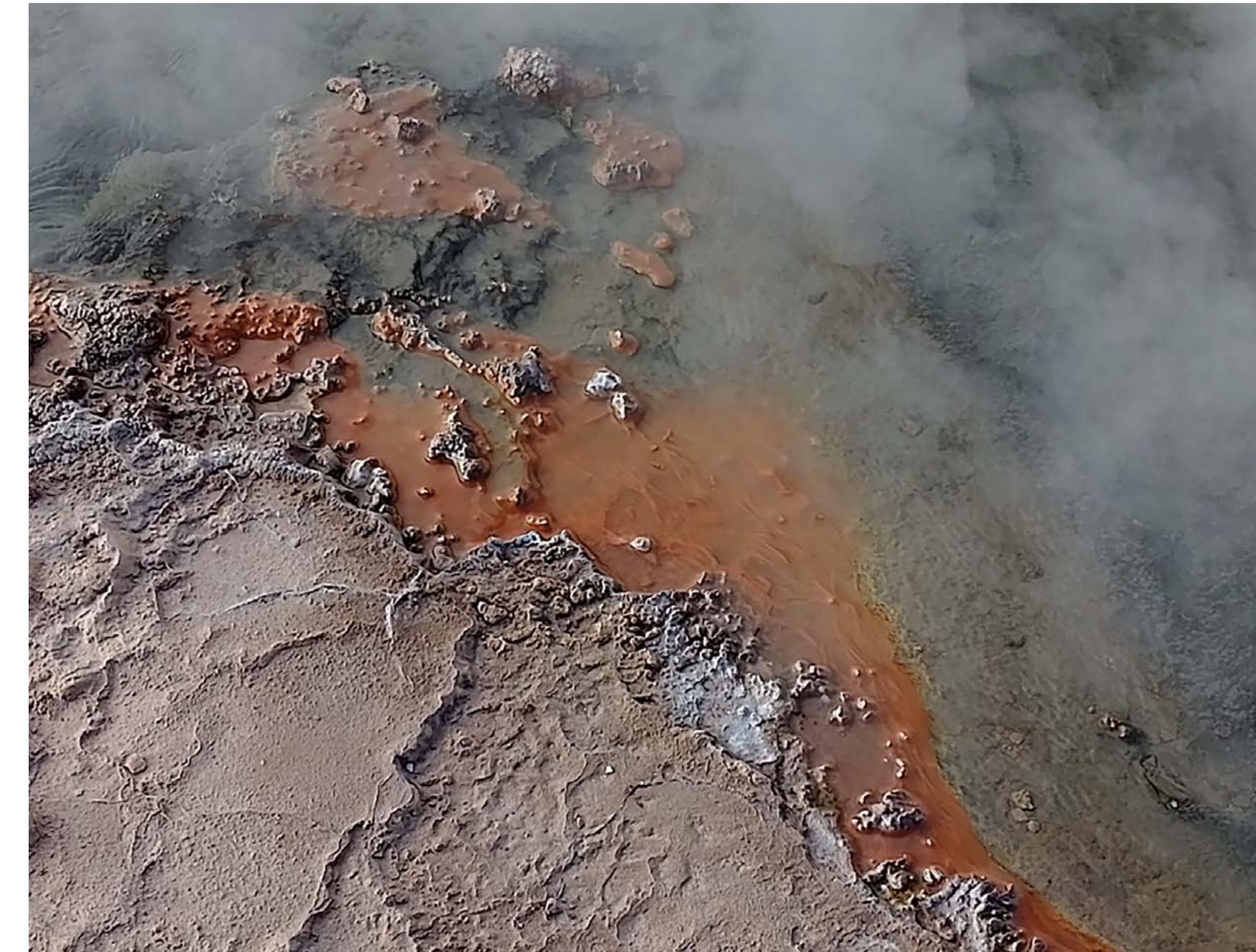
Une première chaire a débuté en 2023, dirigée par le Professeur Eric D. van Hullebusch de l'IPGP, intitulée BioMetCrit, pour "Biométallurgie pour la valorisation des métaux critiques". Dédié à l'investigation des mécanismes fondamentaux de l'affinité et de l'immobilisation des métaux critiques par les microbes, le projet se concentrera sur la bio-précipitation et bio-immobilisation de contaminants de préoccupation émergente (TCEs), en utilisant des micro-organismes tolérants aux ions métalliques. Des collaborations avec le BRGM et des PME permettront de jeter les bases de futurs projets industriels.

Dans les années à venir, l'Atrium des géosciences capitalisera sur l'expertise de l'IPGP en modélisation du sous-sol pour l'appliquer à la production d'hydrogène naturel, la surveillance du stockage du CO₂ ou encore la gestion et l'atténuation des risques naturels. Pour ce dernier point, le projet bénéficiera également des collaborations interdisciplinaires existantes entre l'institut et la Faculté Sociétés et Humanités d'UPCité.

The industrial chairs that make up the Atrium of Geosciences at the IPGP are an action of the Fire Up project of Université Paris Cité, winner of the ExcellencES France 2030 programme (PIA 4). The aim is to develop research projects in the geosciences, in collaboration with industry, in order to support the energy transition and thus contribute to limiting climate change. The chairs will be implemented around the rational and sustainable use of non-fossil resources offered by the subsoil (geothermal energy, natural hydrogen, critical metals...), whether through geological capture and storage of CO₂ and H₂, or through the development of new biogeochemical processes for the extraction and recycling of critical metals. With these chairs, the IPGP aims to establish financially sound and sustainable partnerships with innovative industrial players. A project engineer, Mr David Moreau, has been hired to support the awardees in their research contacts at the industrial level.

In 2023, the first professorship will be launched under the direction of Professor Eric D. van Hullebusch of the IPGP, called BioMetCrit, for "Biometallurgy for the valorisation of critical metals". The project aims to investigate the fundamental mechanisms of affinity and immobilisation of critical metals by microbes and will focus on the bio-precipitation and bio-immobilisation of TCEs of emerging concern using microorganisms tolerant to metal ions. Collaborations with the BRGM and SMEs will lay the groundwork for future industrial projects.

In the coming years, the Atrium of Geosciences will capitalise on IPGP's expertise in subsurface modelling to apply it to natural hydrogen production, CO₂ storage monitoring and natural risk management and mitigation. For the latter, the project will also benefit from existing interdisciplinary collaborations between the Institute and the Faculty of Societies and Humanities of UPCité.



Biofilm périphytique se développant en surface d'un écoulement enrichi en arsenic (Geysers Del Tatio, Chili).
Periphytic biofilm developing on the surface of an arsenic-enriched flow (Geysers Del Tatio, Chile).

En savoir plus / Read more : www.ipgp.fr/atrium-geosciences

Contacts : David Moreau : moreau@ipgp.fr | Eric D. van Hullebusch : vanhullebusch@ipgp.fr

■ Signature d'un MoU avec la China University of Geosciences

Memorandum of Understanding signed with China University of Geosciences

La China University of Geosciences à Pékin (CUGB) et l'IPGP ont formalisé un "mémorandum d'entente" (*Memorandum of Understanding - MoU*) dans le but de renforcer leurs liens et leurs échanges aux niveaux académique et scientifique. Les deux institutions se sont notamment engagées à mettre en œuvre des projets de recherche collaboratifs de pointe dans des domaines d'intérêt commun et à organiser des séminaires académiques conjoints, en vue de favoriser et dynamiser les échanges d'idées et de connaissances.

Cet accord important permet également l'accueil d'étudiants visiteurs de chaque institution pour une durée pouvant aller jusqu'à six mois. En outre, chaque établissement s'engage à recommander les meilleurs candidats pour participer à des programmes de master et de doctorat au sein de l'institution partenaire, sur une période de six à vingt-quatre mois. Enfin, les étudiants de CUGB sont invités à poursuivre des études doctorales à l'IPGP grâce au programme de bourses mis en place par le China Scholarship Council (CSC). Un soutien et un accompagnement complets sont proposés pour faciliter le processus de candidature et assurer une transition sereine.



Signature dans le pavillon Curie de l'IPGP du MoU entre Yalin Lei, administratrice de la China University of Geosciences et Marc Chaussidon, directeur de l'IPGP.

Signing of the MoU between Yalin Lei, Administrator of the China University of Geosciences and Marc Chaussidon, Director of the IPGP, in the IPGP's Curie Pavilion.

Contact : international@ipgp.fr

■ CLEEDI 2023

Deux ans après une première édition réussie, le workshop CLEEDI (Collaborative Exploration of Earth's Deep Interior) s'est une nouvelle fois tenu du 21 au 25 août à Foix, en Ariège. Organisé par l'IPGP et soutenu par le CNRS Terre & Univers, le département de Géosciences de l'ENS, l'IUF ou encore l'ISTeP, il a réuni 25 participants venus de France, d'Allemagne, du Japon et de Suisse. Comme en 2021, cet évènement au format original visait à travailler de manière collaborative sur des petits projets rassemblant géodynamiciens, sismologues, pétrologues et géologues en mode "hackaton".

Ils ont notamment pu travailler sur le montage d'un code en Julia de propagation des ondes sismiques dans un milieu visqueux ou encore sur le filtrage sismologique de modèles géodynamiques. Des temps de médiation scientifique étaient également organisés pendant la semaine à travers des conférences et discussions avec le grand public, une démonstration de sismomètres, ainsi qu'un concert de musique classique dans une église avec projection d'images et vidéos de sciences de la Terre.

Two years after a successful first edition, the CLEEDI workshop (Collaborative Exploration of Earth's Deep Interior) once again took place from August 21st to 25th in Foix, Ariège. Organized by the IPGP and supported by CNRS Terre & Univers, the Department of Geosciences of ENS, IUF, and ISTeP, it brought together 25 participants from France, Germany, Japan, and Switzerland. Like in 2021, this original format event aimed to collaboratively work on small projects involving geodynamicists, seismologists, petrologists, and geologists in a "hackathon" mode.

They were able to work on assembling a Julia code for the propagation of seismic waves in a viscous medium or on the seismic filtering of geodynamic models. Scientific mediation sessions were also organized throughout the week through conferences and exchanges with the general public, a demonstration of seismometers, as well as a classical music concert in a church with images and videos of Earth sciences projected.





Chercheurs invités en 2023

Visiting researchers in 2023

Invité Guest	Affiliation	Invitant Host	Équipe Team
John McCloy	<i>Washington State University, USA</i>	Daniel Neuville	Géomatériaux
Gladys Narbona-Reina	<i>Université de Seville, Espagne</i>	Anne Mangeney	Sismologie
Chad. W. Cuss	<i>Memorial University, Canada</i>	Mickaël Tharaud	Biogéochimie à l'Anthropocène des éléments et contaminants émergents
Miki Nakajima	<i>University of Rochester, USA</i>	Maylis Landeau	Dynamique des fluides géologiques
Daniella Rempe	<i>Jackson School of Geosciences, USA</i>	Julien Bouchez	Géochimie des enveloppes externes
Nadine G Reitman	<i>USGS, USA</i>	Yann Klinger	Tectonique et mécanique de la lithosphère
Anthony Dosseto	<i>University of Wollongon, Australie</i>	Eric Gayer	Géochimie des enveloppes externes
Seung-Sep Kim	<i>Chungnam National University, Corée du sud</i>	Jérôme Dyment	Géosciences marines
Alexandre Canitano	<i>Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan</i>	Pascal Bernard	Sismologie
Andrew Berry	<i>Research School of Earth Sciences, ANU, Australie</i>	Charles Le Losq	Géomatériaux
Kosuke Heki	<i>Hokkaido University, Japon</i>	Elvira Astafyeva	Planétologie et sciences spatiales
Bruce Buffett	<i>UC Berkeley, USA</i>	James Badro	Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale



Charlotte Dejean, lauréate 2023 du concours innovation i-PhD de Bpifrance

Charlotte Dejean, the winner of the 2023 i-PhD innovation competition organised by Bpifrance

Son projet d'extraction bio-assistée à partir de déchets miniers a été sélectionné parmi les lauréats du concours d'innovation i-PhD de l'État, dévoilés lors d'une cérémonie au Théâtre du Châtelet le mardi 4 juillet 2023. Charlotte Dejean, docteure de l'Université Paris Cité et jeune chercheuse dans l'équipe de Lithosphère Organosphère Microbosphère (LOMs) de l'IPGP, va ainsi bénéficier d'un programme d'accompagnement lui permettant d'accélérer la maturation de son projet.

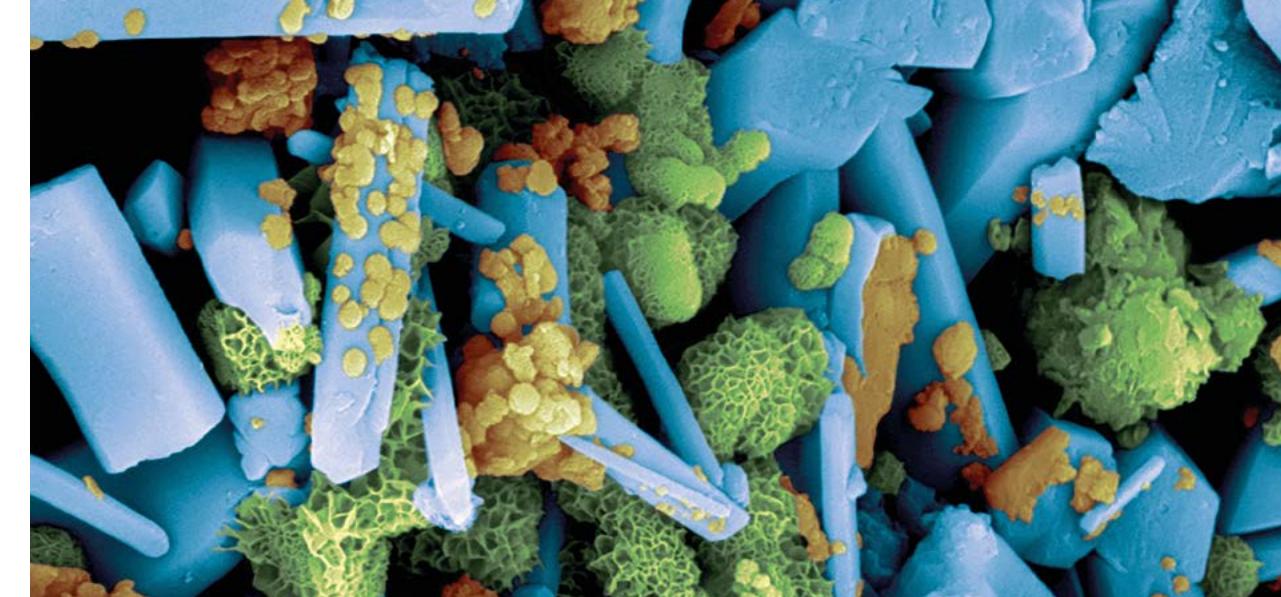
Dans le cadre de France 2030, le Concours d'innovation, opéré pour le compte de l'État par Bpifrance et en collaboration avec l'ADEME sur certaines thématiques, apporte un soutien aux chercheurs et aux entreprises innovantes français, via trois volets complémentaires : i-PhD, i-Lab et i-Nov. Le volet i-PhD, lancé en 2019, s'adresse aux jeunes chercheurs et vise à les attirer vers la valorisation de leurs travaux en vue de créer ou co-créer des startups en rupture technologique, en lien avec les structures de transfert de technologie et les laboratoires de recherche publique. Chaque lauréat du concours i-PhD bénéficie d'un programme d'accompagnement lui permettant d'accélérer son projet (mentorat, accès privilégié à la bourse French Tech, temps d'immersion dans l'écosystème deep tech, outils de promotion pour les Grands Prix).

Charlotte Dejean développe actuellement, avec l'appui du pôle Innovation de l'université Paris Cité, un projet innovant au sein des laboratoires de l'IPGP autour des techniques d'extraction bio-assistée à partir des déchets miniers. "La demande croissante en manganèse se heurte à la diminution concomitante des gisements disponibles et à l'impact environnemental de son extraction"

Her project on bio-assisted extraction from mining waste was selected among the winners of the State's i-PhD innovation competition, unveiled during a ceremony at the Théâtre du Châtelet on Tuesday, July 4, 2023. Charlotte Dejean, a doctoral graduate of the Université Paris Cité and a young researcher in the Lithosphere Organosphere Microbosphere (LOMs) team at the IPGP, will benefit from a support program to accelerate the maturation of her project.

As part of France 2030, the Innovation Competition, operated on behalf of the State by Bpifrance and in collaboration with ADEME on certain themes, provides support to French researchers and innovative companies through three complementary components: i-PhD, i-Lab, and i-Nov. The i-PhD component, launched in 2019, targets young researchers and aims to attract them to the valorization of their work with a view to creating or co-creating startups with technological breakthroughs, in connection with technology transfer structures and public research laboratories. Each winner of the i-PhD competition benefits from a support program to accelerate their project (mentoring, privileged access to the French Tech grant, immersion time in the deep tech ecosystem, promotional tools for the Grand Prizes).

Charlotte Dejean, is currently developing, with the support of the Innovation Center of Université Paris Cité, an innovative project within the laboratories of the IPGP focusing on bio-assisted extraction techniques from mining waste. "The increasing demand for manganese is met with the simultaneous decrease in available deposits and the environmental impact of its extraction," she explains. "In my project, I am



explique-t-elle. "Dans mon projet, je développe cette technique d'extraction bio-assistée à partir de déchets miniers et de bactéries endémiques qui offre un faible coût énergétique et environnemental et élargit le champ d'application de ces technologies de valorisation émergentes"

Ce projet s'inscrit pleinement dans les thématiques de l'IPGP, et notamment celles de l'équipe LOMs, où Charlotte Dejean a effectué ses travaux de thèse et qui a été un des pionniers de l'exploration des écosystèmes intraterrestres nichés au sein des roches. En effet "ce projet se base sur la compréhension des relations entre les écosystèmes microbiens et leurs environnements minéralisés. Or l'équipe LOMs a développé depuis une vingtaine d'année une expertise forte sur cette problématique en mettant au point notamment des techniques de micro-imageries indispensables à leur étude" précise la chercheuse.

Les prochaines grandes étapes sont d'un côté, d'analyser de nouveaux échantillons naturels afin d'observer et de comprendre plus finement les processus entrant en jeu, et en parallèle d'essayer de reproduire ces procédés en laboratoire afin d'obtenir la preuve de concept. "Enfin," conclue-t-elle, "dans le même temps, il va être crucial de s'imprégner de l'écosystème entrepreneurial afin d'en comprendre les enjeux, un peu différent de ceux de la recherche académique, et c'est notamment ce que va permettre cette année en tant que lauréate i-PhD."

developing this bio-assisted extraction technique from mining waste and endemic bacteria, which offers low energy and environmental costs and expands the scope of these emerging valorization technologies."

This project fully aligns with the themes of the IPGP, particularly those of the LOMs team, where Charlotte Dejean conducted her doctoral work and was one of the pioneers in exploring intraterrestrial ecosystems nestled within rocks. Indeed, "this project is based on understanding the relationships between microbial ecosystems and their mineralized environments. The LOMs team has developed strong expertise on this issue over the past twenty years, notably by developing indispensable micro-imaging techniques for their study," the researcher explains.

The next major steps involve analyzing new natural samples to observe and understand more precisely the processes at play, and in parallel, attempting to replicate these processes purely in the laboratory to obtain proof of concept. "Finally," she concludes, "at the same time, it will be crucial to immerse oneself in the entrepreneurial ecosystem to understand its challenges, somewhat different from those of academic research, and this is precisely what being an i-PhD laureate will allow this year."

Contact : dejean@ipgp.fr

Observatoires, thèmes, plateformes et équipes de recherche

Observatories, themes, platforms and research teams

Au 1^{er} septembre 2023 / On 1st of September 2023

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
A venir / Coming soon

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

REVOSIMA : Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte

Volcanological and seismological monitoring network of Mayotte
Aline PELTIER

Observatoires magnétiques / Magnetic Observatories

Vincent LESUR

Observatoire GEOSCOPE/ GEOSCOPE Observatory

Martin VALLÉE, Responsable scientifique / Scientific Manager
Nicolas LEROY, Responsable technique / Technical Manager

Observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles OBSERA

Observatory of Water and Erosion in the Antilles OBSERA
Éric LAJEUNESSE

Centre de données IPGP / IPGP Data Center

Claudio SATRIANO, Responsable scientifique / Scientific Manager
Constanza PARDO, Responsable technique / Technical Manager

Observatoire InSight / InSight Observatory

Philippe LOGNONNÉ

Thèmes Themes

Intérieurs de la Terre et des planètes / Earth and Planetary Interiors

Cécile PRIGENT
James BADRO

Risques naturels / Natural Hazards

Martine SIMOES
François BEAUDUCEL

Système Terre / Earth System Science

Stéphane JACQUEMOUD
Jérôme GAILLARDET

Origines / Origins

Bénédicte MÉNEZ
Frédéric MOYNIER

Plateformes et services communs

Platforms and shared services

Plateau d'analyse haute résolution (PARI) / High-Resolution Analysis Platform (PARI)

Catherine CHAUVEL, Responsable scientifique / Scientific Manager
Mickaël THARAUD, Responsable technique / Technical Manager

Service de calcul parallèle et de traitement de données en sciences de la Terre (S-CAPAD)

Parallel Computing and Data Analysis Platform for Earth Science (S-CAPAD)
Alexandre FOURNIER, Responsable scientifique / Scientific Manager
Geneviève MOGUILNY, Responsable technique / Technical Manager

Lithothèque marine / Marine Rock Repository

Cécile PRIGENT, Responsable scientifique / Scientific Manager

Pôle drones/ Drones Unit

Sébastien BONAIMÉ

Service mutualisé de virtualisation/ Shared virtualisation service

Michel LE COCQ

Infrastructures nationales hébergées National hosted infrastructures

■ Parc de sismomètres "fond de mer" INSU-IPGP / INSU-IPGP Ocean-Bottom Seismometers (OBS)

Wayne CRAWFORD, Responsable scientifique / Scientific Manager
Romuald Daniel, Responsable technique / Technical Manager

■ Centre de coordination et de diffusion de ForM@Ter

Center of Coordination and Distribution of ForM@Ter
Raphaël GRANDIN

■ OZCAR (Observatoires de la zone critique, applications et recherche)

OZCAR (Critical Zone Observatories, Applications and Research)
Jérôme GAILLARDET

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
Yann SIVRY

■ 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

■ Géomatéraiaux / Geomaterials

Daniel NEUVILLE



■ Géomicrobiologie / Geomicrobiology

Alexandre GÉLABERT

■ Géosciences marines / Marine Geosciences

Nathalie FEUILLET

■ Géodésie / Geodesy

Olivier BOCK

■ Paléomagnétisme / Paleomagnetism

Frédéric FLUTEAU

■ Physique des sites naturels / Physics of Natural Sites

Frédéric GIRAUT

■ Planétologie et sciences spatiales / Planetology and Space Sciences

Cécile FERRARI

■ 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 de la recherche et du spatial (Gauthier Hulot), de la directrice adjointe chargée des observatoires (Anne Le Friant), de la directrice adjointe chargée de l'enseignement (Marianne Greff), du directeur adjoint chargé des relations industrielles et internationales (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 2023)
- 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 (Gauthier Hulot), 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 2023)
- Ethics officer and whistleblower: **François Métivier**
- "Public services +" officer: **Marianne Greff**
- Scientific integrity officer: **Julie Carlut**
- Defence security officer: **Antoine Charlot**

Renouvellement des instances de l'IPGP

Renewal of the IPGP's governing bodies

L'année 2023 a vu le renouvellement du conseil d'administration (CA), du conseil scientifique (CS) et du conseil pédagogique (CP) de l'IPGP.

Les compositions complètes de ces trois instances sont disponibles sur le site de l'IPGP :
[> ipgp.fr/institut/gouvernance-et-organisation](http://ipgp.fr/institut/gouvernance-et-organisation)

L'IPGP remercie tout particulièrement les membres extérieurs qui ont bien voulu siéger au sein de ces instances et s'impliquer dans la vie de l'institut :

Membres extérieurs du CA / External members of the Board of Directors

- Olivier Peyret – Président de SLB France, directeur Europe de SLB Nouvelles énergies
- Michèle Cyna – Ex Présidente-directrice générale de Ginger BURGEAP, administratrice du syndicat des énergies renouvelables
- Kevin Guillaume – Secrétaire général de l'alliance d'universités européennes Circle U
- Yan Lavallée – Professeur à l'université Ludwig Maximilian de Munich
- Nicolas Paparoditis – Directeur général adjoint de l'IGN
- Pascale Ultré-Guérard – Directrice adjointe à la stratégie en charge des programmes au CNES
- Elsa Cortijo – Directrice exécutive de l'agence de programme Climat, biodiversité et sociétés durables du CNRS
- Hélène Hébert – Directrice adjointe du Laboratoire de Détection et Géophysique du CEA
- François Houllier – Président de l'IFREMER
- Judith Sausse – Directrice de l'École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy (ENSG)

Membres extérieurs du CS / External members of the Scientific Council

- Philippe Agard – Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTEP), Sorbonne Université
- Muriel Andreani – Laboratoire de Géologie de Lyon, Terre - Planètes - Environnement (LGL-TPE), Université Claude Bernard Lyon 1
- Alessandro Morbidelli – Observatoire de la Côte d'Azur, Collège de France
- Marianne Metois – LGL-TPE, Université Claude Bernard Lyon 1
- Raphael Pik – Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG), Lorraine Université
- Nicolas Coltice – Laboratoire de Géologie ENS, Université Paris Sciences et Lettres.

Membres extérieurs du CP / External members of the Pedagogical Council

- Loïc Labrousse – Directeur de l'école doctorale Géosciences, ressources naturelles et environnement (ED 398) - Sorbonne Université
- Olivier Sissmann – IFPEN

The year 2023 saw the renewal of the IPGP's Board of Directors, Scientific Council and Pedagogical Council.

The full composition of these three bodies is available on the IPGP website:
[> ipgp.fr/institut/gouvernance-et-organisation](http://ipgp.fr/institut/gouvernance-et-organisation)

The IPGP would particularly like to thank the external members who have kindly agreed to sit on these bodies and become involved in the life of the institute:

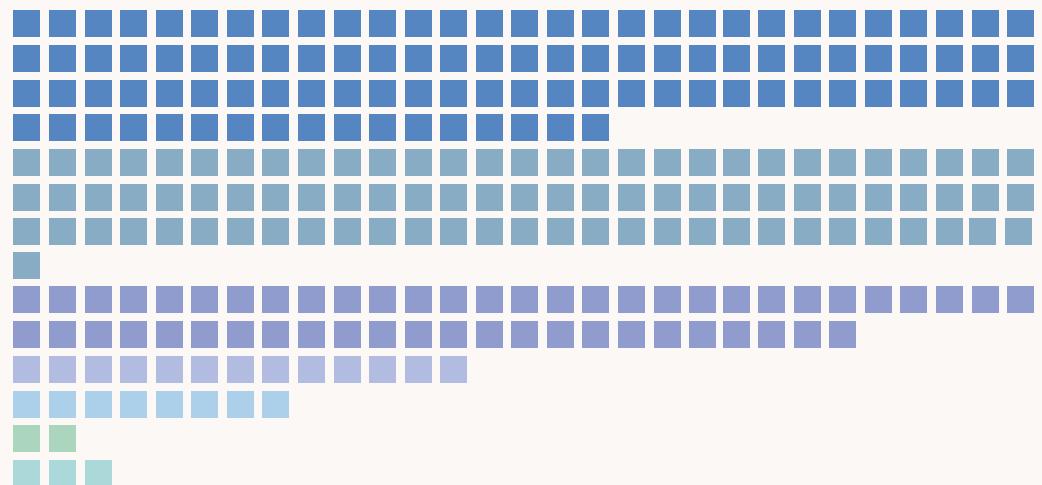
Effectifs Staff

463

personnels en 2023
staff in 2023

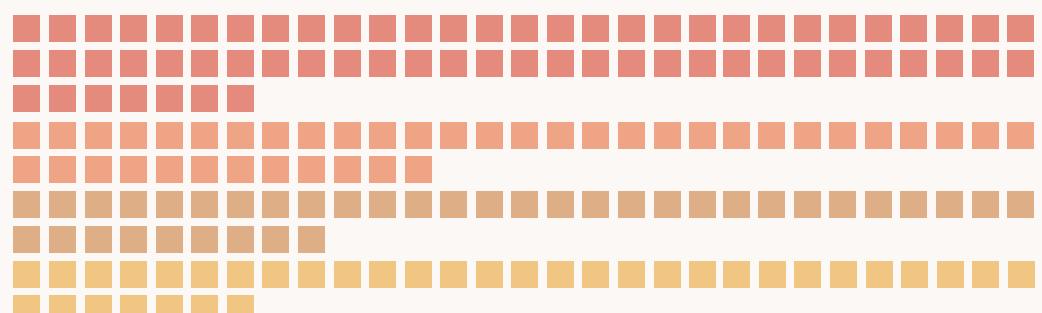
278

permanents
permanent staff



185

non permanents
non-permanent staff



107

personnels IPGP IPGP staff

- 1 directeur director
- 1 directeur général des services general director of services
- 8 professeurs professors
- 4 maîtres de conférences senior lecturers
- 12 physiciens CNAP CNAP senior physicists
- 18 physiciens-adjoints CNAP CNAP physicists
- 63 IATSS engineers, technicians, administrative staff

91

personnels CNRS CNRS staff

- 22 directeurs de recherche senior researchers
- 21 chargés de recherche researchers
- 48 ITA engineers, technicians, administrative staff

54

personnels Université Paris Cité Université Paris Cité staff

- 19 professeurs professors
- 22 maîtres de conférences senior lecturers
- 13 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

3

personnels IRD IRD staff

- 3 chargés de recherche researchers

67

doctorants PhD candidates

- 43 personnels IPGP IPGP staff
- 5 personnels CNRS CNRS staff
- 19 personnels Université Paris Cité Université Paris Cité staff

42

post-doctorants post-doctoral fellows

- 31 personnels IPGP IPGP staff
- 8 personnels CNRS CNRS staff
- 3 personnels Université Paris Cité Université Paris Cité staff

39

IATSS engineers, technicians, administrative staff

- 37 personnels IPGP IPGP staff
- 2 personnels Université Paris Cité Université Paris Cité staff

37

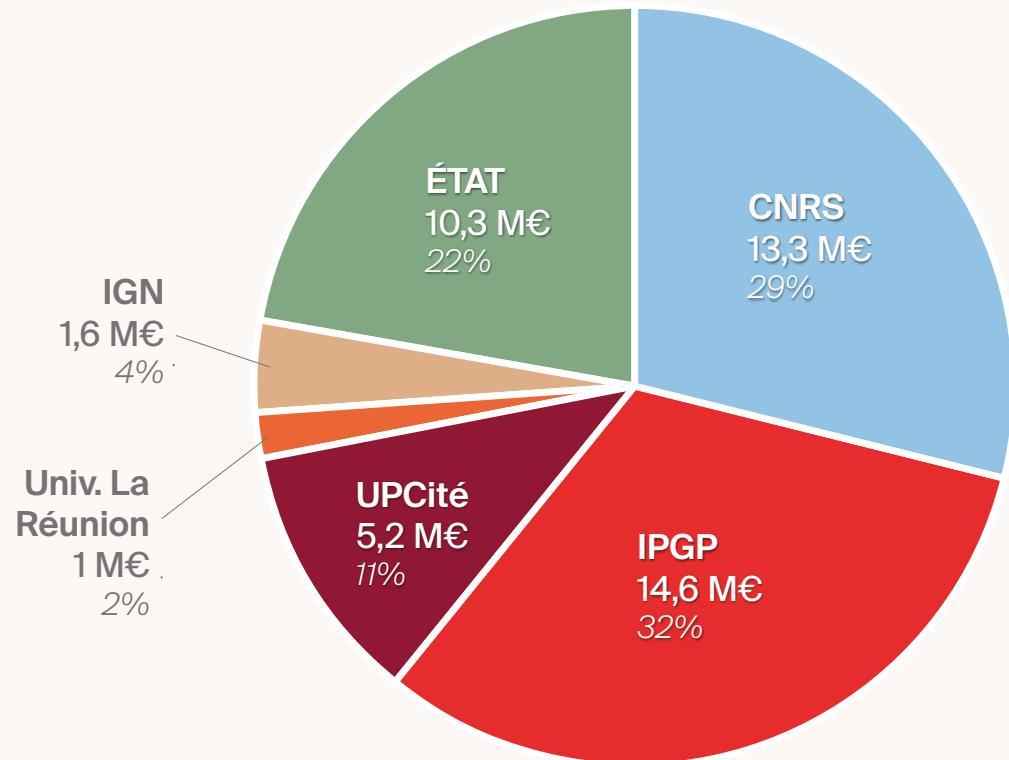
ITA engineers, technicians, administrative staff

- 10 personnels CNRS CNRS staff
- 27 personnels hébergés Hosted staff

Budget

Budget

46 millions d'euros (M€)



Budget complété par l'apport des partenaires sous différentes formes :

- 3,8 M€ en crédits budgétaires
- 27,8 M€ en nature (301 personnels ETP)

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 - Antoine Roux
communication@ipgp.fr

Mise en page Layout

Tiphaine Doria

Rédaction Drafting

Personnels de l'IPGP et service communication.
IPGP staff and communication department.

Impression Print



Imprimerie Mély-Melloni, labellisée PEFC et FSC (papier eco-responsable).
Mély-Melloni Printing, labelled PEFC and FSC (eco-friendly paper).

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 : A. Brusini (p. 6) ; Université Paris Cité (photos p. 10, 14, 17 et photo du haut p. 13) ; ESO/L. Calçada/M. Kornmesser/N. Risinger/skysurvey.org (photo du bas p. 25) ; NASA (photo du haut p. 25) ; Freepik (p. 38) ; IPGP/CNES/N. Sarter (p. 55) ; J. Legros (photos p. 61) ; Google Maps (carte p. 68) ; I. Cornut (photo de gauche p. 93) ; Airbus/Data SIO/NOAA/U.S. Navy/NGA/GEBCO (p. 97) ; IPGP/JPL (p. 112-113) ; Unsplash (p. 19, 20, 21, 23, 24, 58, 66, 83, 84, 128) ; Adobe Stock (p. 37, 74) Droits de reproduction des textes, photos et illustrations réservés.

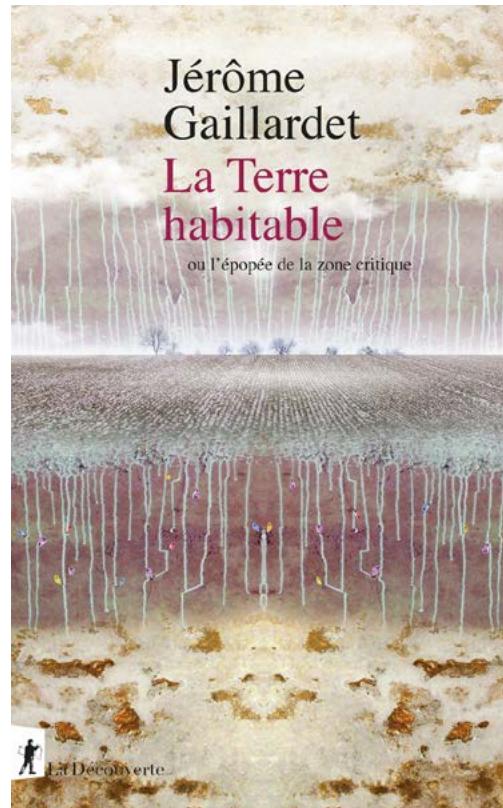
MERCI THANK YOU

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.

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.

En librairie In bookshops

L'année 2023 a vu la sortie en librairie de trois ouvrages écrits ou co-écrits par des chercheurs de l'IPGP.
The year 2023 saw the publication of three books written or co-written by IPGP researchers.



La Terre Habitable, ou l'épopée de la zone critique

Jérôme Gaillardet - Éditions de La Découverte

Géochimiste et professeur à l'IPGP, Jérôme Gaillardet fait dialoguer sciences expérimentales et philosophie en proposant une exploration sensible et accessible de la partie de la planète abritant la vie. Ce livre montre que les vivants, les humains en particulier, n'habitent pas la Terre au sens du globe, mais une infime partie de celui-ci. Une zone comprise entre le ciel et les roches, discontinue, issue de la confrontation de l'énergie du soleil qui active le cycle de l'eau et de l'énergie tellurique qui crée les reliefs. Ce n'est ni le sol traditionnel, ni les écosystèmes, ni les eaux souterraines ou les fleuves ; c'est tout à la fois. Altéré, tissé, ce voile est une zone critique, à découvrir pour en prendre soin et l'habiter mieux. Cette nouvelle Terre tourne, elle aussi. Elle se plie et se déplie en cycles et temporalités, au gré des transformations chimiques, physiques et biologiques.

The Habitable Earth, or the epic of the critical zone

Jérôme Gaillardet - Éditions de La Découverte

Jérôme Gaillardet, a geochemist and professor at the IPGP, brings together experimental science and philosophy in a sensitive and accessible exploration of the part of the planet that supports life. This book shows that living beings, and humans in particular, do not inhabit the Earth in the sense of the globe, but rather a tiny part of it. A discontinuous zone between the sky and the rocks, created by the confrontation of the sun's energy, which activates the water cycle, and the telluric energy that creates the landforms. It is neither the traditional soil, nor ecosystems, nor groundwater or rivers; it is everything at once. Altered, woven, this veil is a critical zone, to be discovered in order to take care of it and live in it better. This new Earth is also turning. It folds and unfolds in cycles and temporalities, as it undergoes chemical, physical and biological transformations.



Institut de physique du globe de Paris

100 ans de sciences pour la planète

Éditions de La Martinière

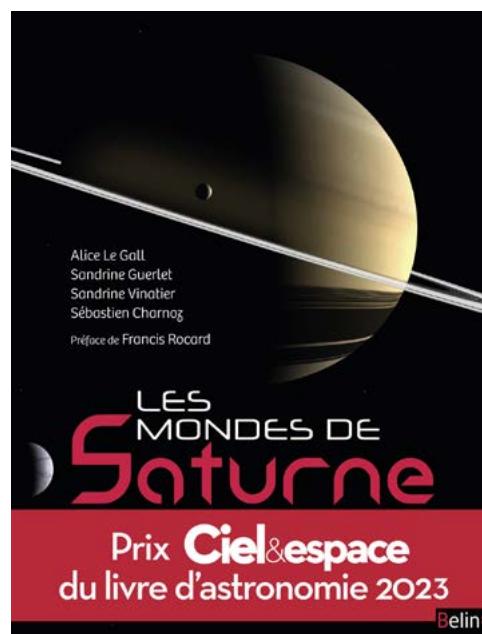
Institut de physique du globe de Paris : 100 ans de sciences pour la planète
Éditions de La Martinière - Disponible en français et en anglais

Co-écrit par les scientifiques de l'IPGP pour commémorer le centenaire de l'institut, ce livre retrace la riche histoire de l'établissement qui couvre, depuis 100 ans, toutes les disciplines majeures des sciences de la Terre, des planètes et de l'environnement. Richement documenté et mêlant archives, schémas et photographies à travers plus de 200 pages, cet ouvrage permet de comprendre notre Terre et son fonctionnement, avec cette ambition de mieux appréhender les enjeux auxquels l'humanité se trouve confrontée.

Institut de physique du globe de Paris : 100 Years of Science for the Planet

Éditions de La Martinière - Available in French and English

Co-written by scientists from the IPGP to commemorate the institute's centenary, this book traces the rich history of the institute, which for 100 years has covered all the major disciplines in Earth, planetary and environmental sciences. Richly documented and combining archives, diagrams and photographs on more than 200 pages, this book helps us to understand our Earth and how it works, with the aim of better understanding the challenges facing humanity.



LES MONDES DE Saturne

Prix Ciel&espace du livre d'astronomie 2023

Belin

Les mondes de Saturne

Sébastien Charnoz, Sandrine Vinatier, Sandrine Guerlet et Alice Le Gall - Éditions Belin

Astrophysicien à l'IPGP et professeur à l'université Paris Cité, Sébastien Charnoz dévoile, avec ses co-auteures, les secrets de la planète géante. Ces scientifiques passionnés explorent le système complexe de Saturne et de ses nombreuses lunes. Ils reviennent sur la formation de la sixième planète de notre système solaire, sur la composition de ses célèbres anneaux et sur ce qui se cache sous les brumes de Titan, le plus impressionnant de ses satellites.

Saturn's worlds

Sébastien Charnoz, Sandrine Vinatier, Sandrine Guerlet and Alice Le Gall - Éditions Belin

Sébastien Charnoz, an astrophysicist at the IPGP and professor at the Université Paris Cité, and his co-authors unveil the secrets of the giant planet. These passionate scientists explore the complex system of Saturn and its many moons. They look back at the formation of the sixth planet in our solar system, the composition of its famous rings and what lies beneath the mists of Titan, its most impressive satellite.

Découvrez notre nouveau site internet !

Discover our new website!



Dans le cadre des célébrations de son centenaire et dans la continuité du renouvellement de son identité graphique, l'IPGP a mis en ligne un nouveau site internet début 2023.

Proposant une navigation optimisée, un design plus clair et une page d'accueil plus agréable et ergonomique, il se dote également de nouvelles fonctionnalités : outils d'accessibilité numérique pour les personnes en situation de handicap, raccourcis par profil d'utilisateur, version anglaise optimisée et étendue, affichage "responsive design" qui s'adapte automatiquement au terminal utilisé, cartes interactives référençant les stations, observatoires et webcams, synchronisation automatique des séminaires et des publications scientifiques...

Bonne visite !

As part of the celebrations to mark its centenary and in line with the renewal of its graphic identity, the IPGP launched a new website at the beginning of 2023.

With optimised navigation, a clearer design and a more pleasant and ergonomic home page, it also offers new functions: digital accessibility tools for the disabled, shortcuts by user profile, an optimised and expanded English version, a 'responsive design' display that automatically adapts to the terminal being used, interactive maps referencing stations, observatories and webcams, automatic synchronisation of seminars and scientific publications, etc.

Enjoy your visit!

www.ipgp.fr

@IPGP_officiel Chaîne IPGP

