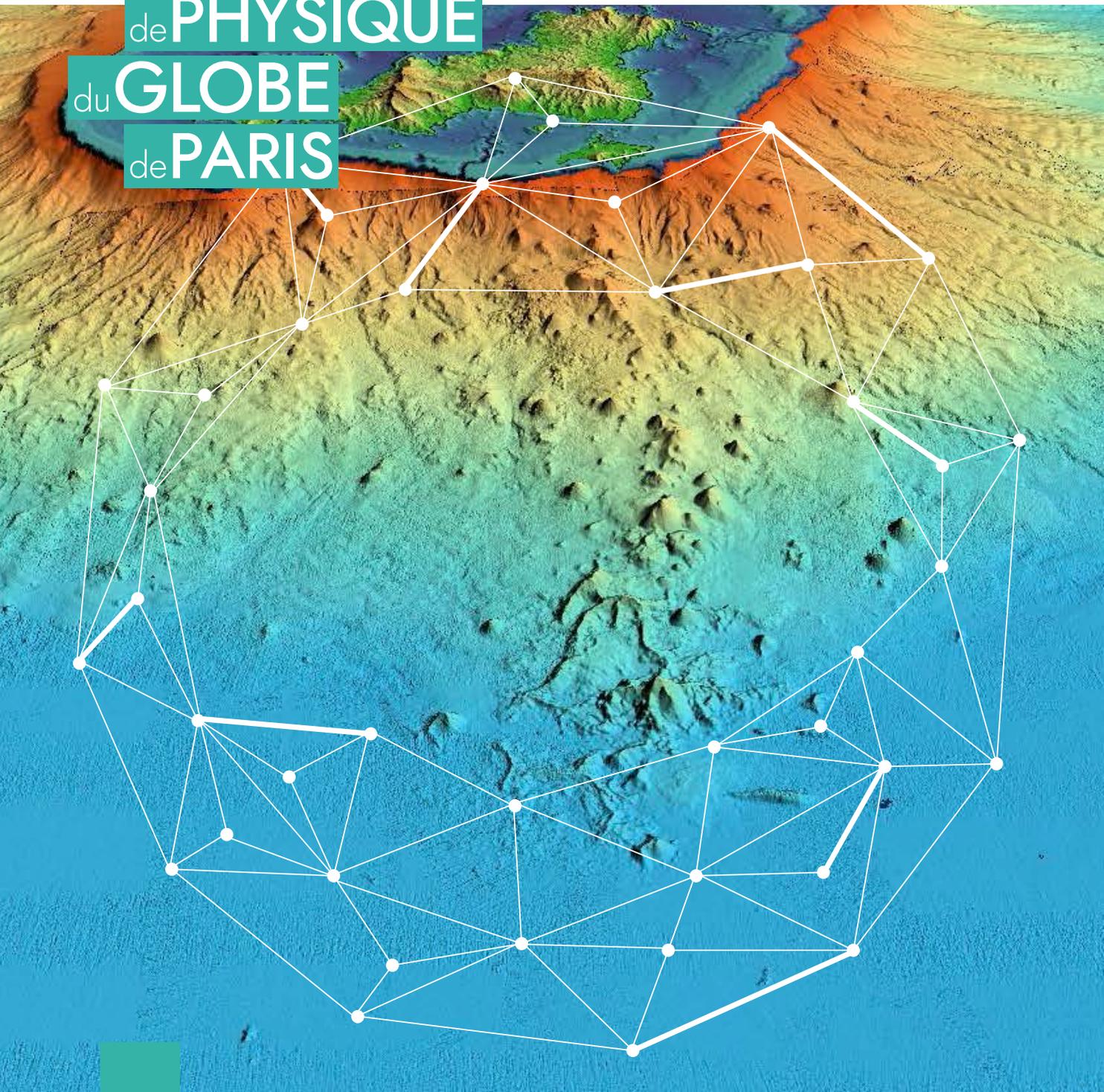


INSTITUT
de **PHYSIQUE**
du **GLOBE**
de **PARIS**



2019

Rapport annuel
Annual report



Sommaire

Contents

- 2 • Éditoriaux
Editorials
- 6 • Liste des membres extérieurs du CA
List of external Board members
- 7 • Entretien avec Christine Clerici,
Présidente d'Université de Paris
Interview with Christine Clerici,
Chairman of Université de Paris
- 10 • L'établissement IPGP
The IPGP Institution
- 12 • Observatoires, thèmes, plateformes et équipes
Observatories, themes, platforms and teams
- 16 • Effectifs
Staff
- 18 • Chiffres clés
Key figures
- 19 • Une nouvelle lithothèque marine à l'IPGP
A new Marine Rock Repository at the IPGP
- 20 • Vie de la recherche
Research life
- 24 • Prix et distinctions
Awards and honours
- 26 • Nouveaux chercheurs et enseignants-chercheurs
New researchers and teachers-researchers
- 31 • Intérieurs de la Terre et des planètes
Earth and planetary interiors
- 37 • Risques naturels
Natural hazards
- 45 • Système Terre
Earth system science
- 53 • Origines
Origins
- 58 • Volcan sous-marin au large de Mayotte,
retour sur une découverte exceptionnelle
Underwater volcano off the coast of Mayotte,
return on an exceptional discovery
- 62 • L'archéomagnétisme à l'IPGP
Archaeomagnetism at the IPGP
- 65 • Observatoires
Observatories
- 86 • Réseau des observatoires et stations de l'IPGP
Network of the IPGP observatories and stations
- 89 • Enseignement
Teaching
- 95 • Congrès des doctorants
PhD candidate Congress
- 96 • Coup d'œil sur deux thèses
Two theses at a glance
- 99 • Relations internationales
International relationships
- 107 • Partenariats
Partnerships
- 111 • Vie de l'établissement
Institution's life

En couverture : nouveau volcan sous-marin découvert en mai 2019 au large de Mayotte (voir page 58 pour plus d'informations)

Cover: new underwater volcano discovered in May 2019 off the coast of Mayotte (see page 58 for more information)

© MAYOBS - CNRS, IPGP-Université de Paris, IFREMER, BRGM



Éditoriaux Editorials

Marc Chaussidon
Directeur de l'IPGP
IPGP Director

« Au moment où ce rapport est en passe d'être finalisé, nous voyons la fin de cette période de plus de deux mois au cours de laquelle l'ensemble de nos activités ont été fortement réduites, à la suite du confinement mis en place mi-mars 2020 pour faire face à l'épidémie de Covid-19. Je ne pouvais pas commencer cette édition 2019 sans avoir en tête cette épreuve que nous venons de vivre et remercier tous ceux qui ont permis à notre établissement de continuer à fonctionner en assurant l'essentiel vis-à-vis de nos personnels, de nos étudiants et de nos missions d'observation.

En lisant ce rapport annuel, j'espère que vous saurez apprécier le dynamisme et l'originalité des recherches menées à l'IPGP au sein de ses seize équipes, le travail considérable réalisé dans ses observatoires pour assurer le suivi et la qualité des observations et distribuer les données scientifiques à la communauté, et que vous mesurerez l'attractivité de l'institut à travers la variété de sa communauté étudiante.

Même si les résultats obtenus ont été nombreux cette année encore, notamment le sismomètre SEIS équipant la sonde InSight qui a donné une première vision de la sub-surface martienne, le fait le plus marquant aura été la découverte d'un quatrième volcan actif sur le sol français. Ce volcan se situe au large de Mayotte, à 3500 m de profondeur et à 50 km à l'est de l'île. Cette découverte, effectuée en mai 2019 lors d'une campagne océanographique organisée pour chercher les causes de la crise sismique que traversait Mayotte depuis un an, est le fruit d'un travail en commun entre l'IPGP, le CNRS, l'IFREMER

"As this report is being finalized, we are seeing the end of this period of more than two months during which all our activities have been greatly reduced as a result of the containment put in place in mid-March 2020 to deal with the Covid-19 epidemic. I could not begin this 2019 report without having in mind this period we have just lived through and thanking all those who have ensured that our institution has continued to operate in an essential way with regard to all our staff, our students and our observation missions.

In reading this annual report, I hope that you will be able to appreciate the dynamism and originality of the research that is carried out at the IPGP in its 16 teams, the considerable work done in its observatories to ensure continuous and high-quality observations and to distribute the scientific data to the community, and that you will measure the attractiveness of the Institute through the variety of its student community.

Even though many results have been achieved this year again, in particular the SEIS seismometer fitted to the InSight probe, which gave a first view of the Martian subsurface, the most striking fact was the discovery of a fourth active volcano on the French territory. This volcano is located off the coast of Mayotte at a depth of 3500 m and 50 km east of the island. This discovery, made in May 2019 during an oceanographic campaign organised to search for the causes of the seismic crisis that has been affecting Mayotte for the past year, is the result of joint work by the IPGP, the CNRS, the IFREMER and the BRGM. The volume of lava emitted, the continuity of the



De gauche à droite
From left to right: Gauthier Hulot, Antoine Charlot, François Métivier, Marc Chaussidon, Marc Benedetti, Anne Le Friant et Jean-Paul Montagner.
© IPGP

et le BRGM. Le volume de laves émis, la continuité de l'activité et la découverte lors des campagnes successives d'une activité volcano-tectonique sous-marine beaucoup plus proche de l'île ont amené l'IPGP et la communauté nationale à une large mobilisation et à la création par le Premier ministre le 26 décembre 2019 d'un quatrième observatoire volcanologique et sismologique appelé REVOSIMA (réseau d'observation volcanologique et sismologique de Mayotte). Placé sous la responsabilité opérationnelle de l'IPGP avec ses partenaires (CNRS, IFREMER et BRGM), ce dernier est hébergé à l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise.

À peine quelques semaines avant cette découverte exceptionnelle, était publié le 20 mars 2019 au Journal officiel le décret créant Université de Paris, modifiant les statuts de l'IPGP pour permettre son intégration comme établissement composante de cette nouvelle université. Cette étape cruciale dans l'histoire de notre institut, qui fêtera ses 100 ans en 2021, nous offre de nouvelles perspectives de développement, comme l'indique dans un entretien à suivre Christine Clerici, présidente d'Université de Paris. L'IPGP continuera à innover pour assurer ses responsabilités sociétales face aux risques naturels telluriques et au changement environnemental et climatique. »

activity, and the discovery during successive campaigns of a submarine volcano-tectonic activity much closer to the island, led the IPGP and the national community to a large mobilization and to the creation by the Prime Minister on December 26, 2019 of a fourth volcanological and seismological observatory called REVOSIMA (Mayotte volcanological and seismological observation network). Placed under the operational responsibility of the IPGP with its partners (CNRS, IFREMER and BRGM), it is housed at the Piton de la Fournaise volcanological observatory.

Barely a few weeks before this exceptional discovery, the decree creating Université de Paris was published in the Official Journal on March 20, 2019, modifying the statutes of the IPGP to allow its integration as a component establishment of this new university. This crucial stage in the history of our Institute, which will celebrate its 100th anniversary in 2021, offers us new development prospects, as Christine Clerici, President of Université de Paris, points out in an interview to follow. The IPGP will continue to innovate in order to meet its societal responsibilities in the face of natural telluric hazards and environmental and climate change."



Olivier Peyret
Président du conseil d'administration
Chairman of the Board of Directors
Président de Schlumberger France
Chairman of Schlumberger France

« Il ne fait nul doute que 2019 restera pour l'IPGP une année qui fera date, une année de changements profonds, une année charnière offrant des opportunités immenses.

Mais d'abord un mot sur la crise sanitaire actuelle du Covid-19 que nous traversons. A l'heure où j'écris ces quelques lignes, en ce début de mois de juillet 2020, la pandémie semble s'apaiser en Europe mais elle sévit toujours aux Amériques et nous rappelle ô combien nous restons vulnérables. Elle nous rappelle aussi qu'un évènement à l'origine très ponctuel dans le temps et dans l'espace peut se propager inexorablement partout dans le monde et prendre une ampleur telle qu'il engendre l'une des plus graves crises de mémoire d'homme. Evidemment tout ceci ne surprendra guère un chercheur en géosciences pour qui l'interdépendance entre l'infiniment petit et l'infiniment grand est une évidence.

Dans le monde de demain il nous faudra travailler de façon différente et accélérer les grandes transitions sociétales à commencer par le numérique qui permet de rester connecté et d'interagir efficacement même de loin. La transition écologique sera au cœur des débats et de la recherche avec la prise de conscience que « local » et « global » restent interconnectés.

Ces transitions sont autant d'opportunités pour que l'IPGP progresse et développe encore plus son leadership et ses performances en matière d'enseignement et d'ingénierie

"There is no doubt that 2019 will remain a landmark year for the IPGP, a year of profound change, and a pivotal year with immense opportunities.

But first a word about the current health crisis we're going through with Covid-19. As I write these few lines at the beginning of July 2020, the pandemic seems to be subsiding in Europe but it is still raging in the Americas and reminds us how vulnerable we remain. It also reminds us that an event that was originally very isolated in time and space can spread inexorably throughout the world and take on such a scale that it causes one of the most serious crises in human memory. Obviously, all this will hardly surprise a geoscientist for whom the interdependence between the infinitely small and the infinitely large is self-evident.

In tomorrow's world we will have to work in a different way and accelerate the major societal transitions, starting with digital technology, which allows us to stay connected and interact effectively even from a distance. The ecological transition will be at the heart of debates and research with the realization that "local" and "global" remain interconnected.

These transitions are opportunities for the IPGP to progress and further develop its leadership and performance in teaching and educational engineering, in research related to major global societal issues, and in the observation of natural phenomena which complements



pédagogique, de recherche liée aux grands enjeux sociétaux globaux, et enfin d'observation des phénomènes naturels qui complète l'excellence théorique et permet à notre Institut de rester fièrement ancré les pieds sur Terre (ou sur Mars...).

Et, en plus, nous ne sommes plus seuls...

En effet, depuis mars 2019 nous sommes l'une des quatre composantes de la nouvelle Université de Paris après un engagement à l'unanimité de tous les membres de notre conseil d'administration : un grand moment historique.

Cette appartenance nous donne l'opportunité d'atteindre une nouvelle dimension en accédant à des ressources très importantes, à une complémentarité des disciplines, à la notoriété d'une Université qui peut rivaliser avec les plus prestigieuses du monde. Elle nous donne des devoirs aussi, à commencer par celui d'engager notre propre réseau d'excellence au service de l'Université. Nous nous y engageons avec enthousiasme et diligence.

Un nouveau chapitre s'ouvre qui s'annonce passionnant. »

theoretical excellence and allows our Institute to remain proudly anchored with its feet firmly planted on Earth (or on Mars...).

And, what's more, we're not alone anymore...

Since March 2019, we are one of the four components of the new Université de Paris after a unanimous commitment by all the members of our Board of Directors — a great historical moment.

This affiliation gives us the opportunity to reach a new level by gaining access to substantial resources, a range of complementary disciplines, and the notoriety of a University that can compete with the most prestigious in the world. It also gives us responsibilities, starting with the duty to commit our own network of excellence in serving the University. We commit ourselves to this enthusiastically and with determination.

A new and exciting chapter is beginning."



Liste des membres extérieurs du CA List of external Board members

Olivier Peyret	Président de Schlumberger France Chairman of Schlumberger France
Bruno David	Président du Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) President of the National Museum of Natural History (MNHN)
Daniel Bursaux	Directeur général de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) Director General of the National Institute of Geographic and Forest Information (IGN)
François Houllier	Président de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER) President of the French Research Institute for Exploitation of the Sea (IFREMER)
Juliette Lambin-Artru	Directrice du département Science, exploration et observation du Centre National d'Études Spatiales (CNES) Director of the Science, Exploration and Observation Department of the French National Centre for Spaces Studies (CNES)
Florence Lambert	Directrice du Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies Nouvelles et les Nanomatériaux (CEA-LITEN) Director of the Innovation Laboratory for New Energy Technologies and Nanomaterials (CEA-LITEN)
Elizabeth Vergès	Directrice de recherche CNRS, Chargée de mission MESRI « Observation » CNRS Senior Researcher, Observation Officer of the Ministry of Higher Education, Research and Innovation
Anne le Guennec	Directrice générale des activités Recyclage & Valorisation des Déchets VEOLIA France Managing Director of Waste Recycling & Recovery VEOLIA France
Anne Marie Lagrange	Directrice de recherche CNRS à l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG) CNRS Senior Researcher at the Institute of Planetology and Astrophysics of Grenoble (IPAG)
Yann Lavallée	Professeur à l'Université de Liverpool Professor at the University of Liverpool



Entretien avec Christine Clerici, Présidente d'Université de Paris Interview with Christine Clerici, Chairman of Université de Paris

Concrètement, qu'est-ce qui relie l'IPGP à Université de Paris ? Concretely, what connects the IPGP to Université de Paris?

Université de Paris est une université de recherche intensive, pluridisciplinaire et de rang mondial, qui constitue avec ses trois facultés un environnement naturellement proche de l'institut de physique du globe de Paris. Il existe en effet des liens historiques et géographiques étroits entre les membres fondateurs de la nouvelle université et l'institut. Des collaborations solides sont établies dans de nombreux domaines de recherche et des projets aux interfaces entre les sciences de la Terre et d'autres disciplines (astrophysique, biologie, médecine, chimie, sciences des matériaux, sciences humaines et sociales...) sont menés conjointement depuis de nombreuses années.

Université de Paris is an intensive world-class multidisciplinary research university which, with its three faculties, provides an environment that is naturally similar to that of the Institut de physique du globe de Paris. There are close historical and geographical links between the founding members of the new university and the Institute. Strong collaborations are established in many fields of research, and projects at the intersections between Earth sciences and other disciplines (astrophysics, biology, medicine, chemistry, material sciences, human and social sciences, etc.) have been conducted jointly for many years.

Focus

Que représente l'association d'un établissement tel que l'IPGP à Université de Paris ?

What does the partnership of an institution such as the IPGP with Université de Paris represent?

Intégré comme établissement composante au sein d'Université de Paris, l'IPGP participe à la recherche et à la formation de notre université et à son rayonnement national et international tout en gardant ses missions spécifiques. L'IPGP a toujours favorisé une certaine transversalité entre les disciplines, comme par exemple avec la création de ses quatre grands thèmes de recherche, et c'est cette interdisciplinarité qui donne tout son sens à son intégration. En effet, Université de Paris couvre un très large spectre disciplinaire et possède toutes les ressources pour répondre aux grands défis sociétaux de demain, déjà formalisés à travers la création de grands programmes tels que le Centre des Politiques de la Terre auquel l'IPGP participe activement. L'institut a vocation à jouer un rôle majeur dans le développement de nouveaux instituts interdisciplinaires sur l'environnement, le spatial et les big data.

Integrated as a constituent establishment within Université de Paris, the IPGP participates in our university's research and educational programmes and in its national and international influence, while maintaining its specific objectives. The IPGP has always promoted a cross-disciplinary approach, as for example with the creation of its four main research themes, and it is this interdisciplinarity that makes this affiliation so meaningful. Université de Paris covers a very broad spectrum of disciplines and has all the resources to address the major societal challenges of the future, already formalised through the creation of major programmes such as the Earth Policy Centre in which the IPGP is actively involved. The Institute is poised to play a major role in the development of new interdisciplinary institutes on the environment, space and big data.



Emblématique de la collaboration étroite entre l'Université de Paris (ses Facultés et l'IPGP) et Sciences Po, le Centre des Politiques de la Terre a pour ambition de faire émerger une communauté de recherche travaillant sur la nécessaire convergence des sciences naturelles et expérimentales et des sciences humaines et sociales pour aborder les enjeux complexes de l'Anthropocène.

A symbol of the close collaboration between Université de Paris (its Faculties and the IPGP) and Sciences Po, the Earth Policy Centre aims to create a research community working on the necessary convergence of the natural and experimental sciences and the human and social sciences to address the complex issues of the Anthropocene.

© Université de Paris - Centre des Politiques de la Terre



Quelles sont les valeurs principales que partagent les deux établissements ?

What are the main values shared by the two institutions?

Avec l'IPGP, Université de Paris a la possibilité d'occuper une place de premier plan dans la recherche sur les risques environnementaux et naturels au sens large. Nous souhaitons faire du développement durable et de la protection de notre planète un thème transverse fort d'Université de Paris. Cela inclut naturellement les conséquences du changement climatique, mais grâce aux synergies avec les autres secteurs disciplinaires, nous pourrons aller au-delà.

With the IPGP, Université de Paris has the opportunity to occupy a leading position in research on environmental and natural risks in the broadest sense. We wish to make sustainable development and the protection of our planet a strong common theme of Université de Paris. This naturally includes the consequences of climate change, and due to collaborations with other disciplinary sectors, we will be able to go even further.

Grâce à l'IPGP, Université de Paris est l'une des seules universités en France et l'une des rares à l'international à offrir un cursus en sciences de la Terre, de l'environnement et des planètes qui soit attractif, intégré depuis la licence jusqu'au master et la thèse, accessible aux étudiants non-francophones, et qui bénéficie de liens forts avec la physique, la chimie, les mathématiques et les sciences humaines et sociales.

Thanks to the IPGP, Université de Paris is one of the only universities in France and one of the few internationally to offer an attractive, integrated curriculum in Earth, environmental and planetary sciences, from bachelor's to master's and thesis levels, accessible to non-French-speaking students, with strong links to physics, chemistry, mathematics and the human and social sciences.

Enfin, une ambition commune anime nos deux établissements, celle de faire connaître et partager la science de façon exigeante tout en étant compréhensible, pour permettre à chacune et chacun de participer à la recherche et aux défis de demain.

Finally, our two institutions share a common ambition: to make science known and to share it in a way which is demanding yet understandable, to enable everyone to participate in research and the challenges of tomorrow.



L'établissement IPGP The IPGP Institution

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 la nouvelle Université de Paris, il est également membre de l'Alliance Université Sorbonne Paris Cité. Il assure avec Université de Paris, le CNRS, l'Université de La Réunion et l'IGN la tutelle de l'UMR 7154 IPGP, qui regroupe toutes les activités de recherche. L'IPGP assure aussi la tutelle de l'UMS 3454 IPGP, avec le CNRS, qui regroupe toutes les activités d'observation. En outre, l'IPGP est un laboratoire spatial du CNES.

Il rassemble environ 500 personnes : chercheurs recrutés dans le monde entier, ingénieurs, techniciens, agents administratifs, post-doctorants et doctorants de tous pays 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 des institutions étrangères prestigieuses, permettant des échanges scientifiques permanents dans le monde entier.

Organisme 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 qui sont essentielles pour l'étude des systèmes naturels. L'IPGP a la charge de services d'observation labellisés en volcanologie, sismologie, magnétisme, gravimétrie et érosion. L'observatoire de Chambon-la-Forêt (France métropolitaine) assure la mesure continue du champ magnétique terrestre initiée il y a presque un siècle et demi et 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.

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. The IPGP is integrated into the new Université de Paris, and it is also a member of the Sorbonne Paris Cité Alliance. It supervises with Université de Paris, 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 UMS 3454 IPGP, which includes all observation activities. In addition, the IPGP is a CNES space laboratory.

It brings together around 500 people: researchers recruited from all over the world, engineers, technicians, administrative staff and post-doctoral and doctoral students from all countries sharing the same passion for Earth, planetary and environmental sciences. Numerous cooperation agreements are in place with prestigious foreign institutions, allowing permanent scientific exchanges worldwide.

A world-renowned geoscience research organization, 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, magnetism, gravimetry and erosion. The observatory in Chambon-la-Forêt (metropolitan France) ensures the continuous measurement of the Earth's magnetic field initiated more than 100 years ago and 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 EOST, two global geophysical networks that monitor magnetic field variations (INTERMAGNET network) and global seismic activity (GEOSCOPE network).



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).

L'IPGP héberge des moyens de calcul puissants et des installations expérimentales et analytiques de dernière génération et bénéficie d'un soutien technique de premier plan. Sa structure souple facilite les interactions entre les 16 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.

L'IPGP est responsable de plusieurs formations en licence, master et doctorat, en étroite collaboration avec Université de Paris.

The IPGP hosts powerful computing resources and state-of-the-art experimental and analytical facilities and benefits from first-class technical support. Its flexible structure facilitates interaction between the 16 research teams working together on the four main themes of the institute: Interiors of the Earth and Planets, Natural Hazards, Earth System and Origins.

The IPGP is responsible for several bachelor's, master's and doctoral courses, in close collaboration with Université de Paris.



Observatoires, thèmes, plateformes et équipes de recherche

Observatories, themes, platforms and research teams



Observatoires volcanologiques et sismologiques
Volcanological and Seismological Observatories

Jean-Christophe KOMOROWSKI
Resp. scientifique
Scientific Manager
Arnaud LEMARCHAND
Resp. opérationnel
Operational Manager

> OVSM : Observatoire volcanologique et sismologique de la Martinique
Volcanological and Seismological Observatory of Martinique

Anne-Marie LEJEUNE

> OVSG : Observatoire volcanologique et sismologique de la Guadeloupe
Volcanological and Seismological Observatory of Guadeloupe

Roberto MORETTI

> OVPF : Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise
Volcanological Observatory of Piton de la Fournaise

Aline PELTIER

Observatoires magnétiques
Magnetic Observatories

Vincent LESUR

OBSERA : Observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles
Observatory of Water and Erosion in the Caribbean

Éric LAJEUNESSE

Centre de données IPGP
IPGP Data Center

Claudio SATTRIANO

Centre de coordination et de diffusion de ForM@Ter
Center of Coordination and Distribution of Form@ter

Michel DIAMENT



Intérieurs de la Terre et des planètes
Earth and Planetary Interiors

Cinzia FARNETANI
Nobuaki FUJI

Risques naturels
Natural Hazards

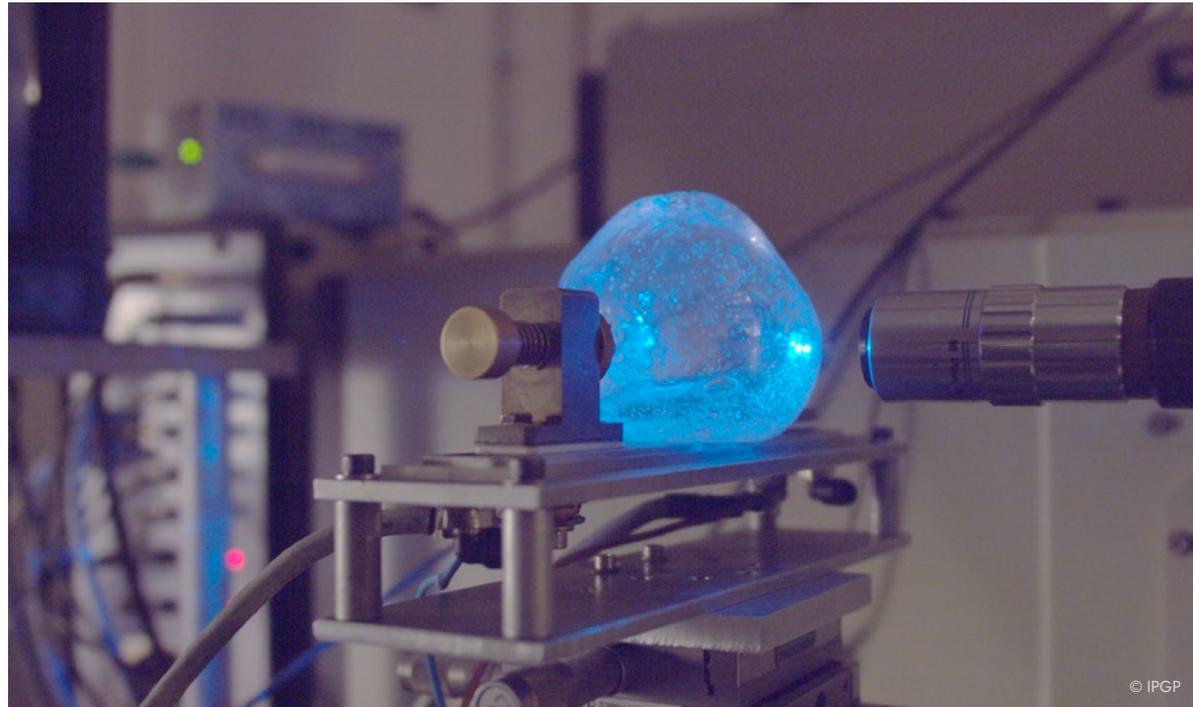
Martine SIMOES
Giovanni OCCHIPINTI
Séverine MOUNE

Système Terre
Earth System Science

Julien BOUCHEZ
Stéphane JACQUEMOUD

Origines
Origins

Bénédicte MENEZ
Frédéric MOYNIER



Plateformes et services communs **Platforms and shared services**

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

Catherine CHAUVEL
Resp. scientifique
Scientific Manager
Mickaël THARAUD
Resp. 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

Jean-Pierre VILOTTE
Resp. scientifique
Scientific Manager
Geneviève MOGUILNY
Resp. technique
Technical Manager

Sismomètres « fond de mer » INSU-IPGP
INSU-IPGP Ocean-Bottom Seismometers (OBS)

Wayne CRAWFORD
Resp. scientifique
Scientific Manager
Romuald DANIEL
Resp. technique
Technical Manager

Lithothèque marine de l'IPGP
IPGP's Marine Rock Repository

Catherine MEVEL
Javier ESCARTIN
Resp. scientifiques
Scientific Managers

Équipes **Teams**

Biogéochimie environnementale
Environmental Biogeochemistry

Rémi LOSNO

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

Julien SIEBERT

Dynamique des fluides géologiques
Geological Fluid Dynamics

Julien AUBERT

Géochimie des enveloppes externes
External Envelopes Geochemistry

Jérôme GAILLARDET

Géochimie des isotopes stables
Stable Isotope Geochemistry

Magali ADER

Géomagnétisme
Geomagnetism

Marianne GREFF

Géomatériaux
Geomaterials

Daniel NEUVILLE

Géomicrobiologie
Geomicrobiology

Alexandre GELABERT

Géosciences marines
Marine Geosciences

Nathalie FEUILLET

Géodésie
Geodesy

Isabelle PANET

Paléomagnétisme
Paleomagnetism

Frédéric FLUTEAU

Physique des sites naturels
Physics of Natural Sites

Frédéric GIRAULT

Planétologie et sciences spatiales
Planetology and Space Sciences

Cécile FERRARI

Sismologie
Seismology

Eléonore STUTZMANN

Systèmes volcaniques
Volcanic Systems

Jean-Christophe KOMOROWSKI

Tectonique et mécanique de la lithosphère
Lithosphere Tectonics and Mechanics

Yann KLINGER



Effectifs Staff

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), du directeur adjoint chargé de l'enseignement (François Métivier), du directeur adjoint chargé des relations industrielles (Marc Benedetti) et du directeur adjoint chargé des relations internationales (Jean-Paul Montagner).

Le dispositif de pilotage de l'IPGP 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 trois autres instances : le comité technique, la commission paritaire d'établissement et le comité d'hygiène, sécurité et conditions de travail.

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 (François Métivier), the deputy director for industrial relations (Marc Benedetti) and the deputy director for international relations (Jean-Paul Montagner).

The IPGP's steering system relies in particular on three bodies: a board of directors who 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. Three other bodies exist: the technical committee, the joint committee of establishment and the safety and health council.

497

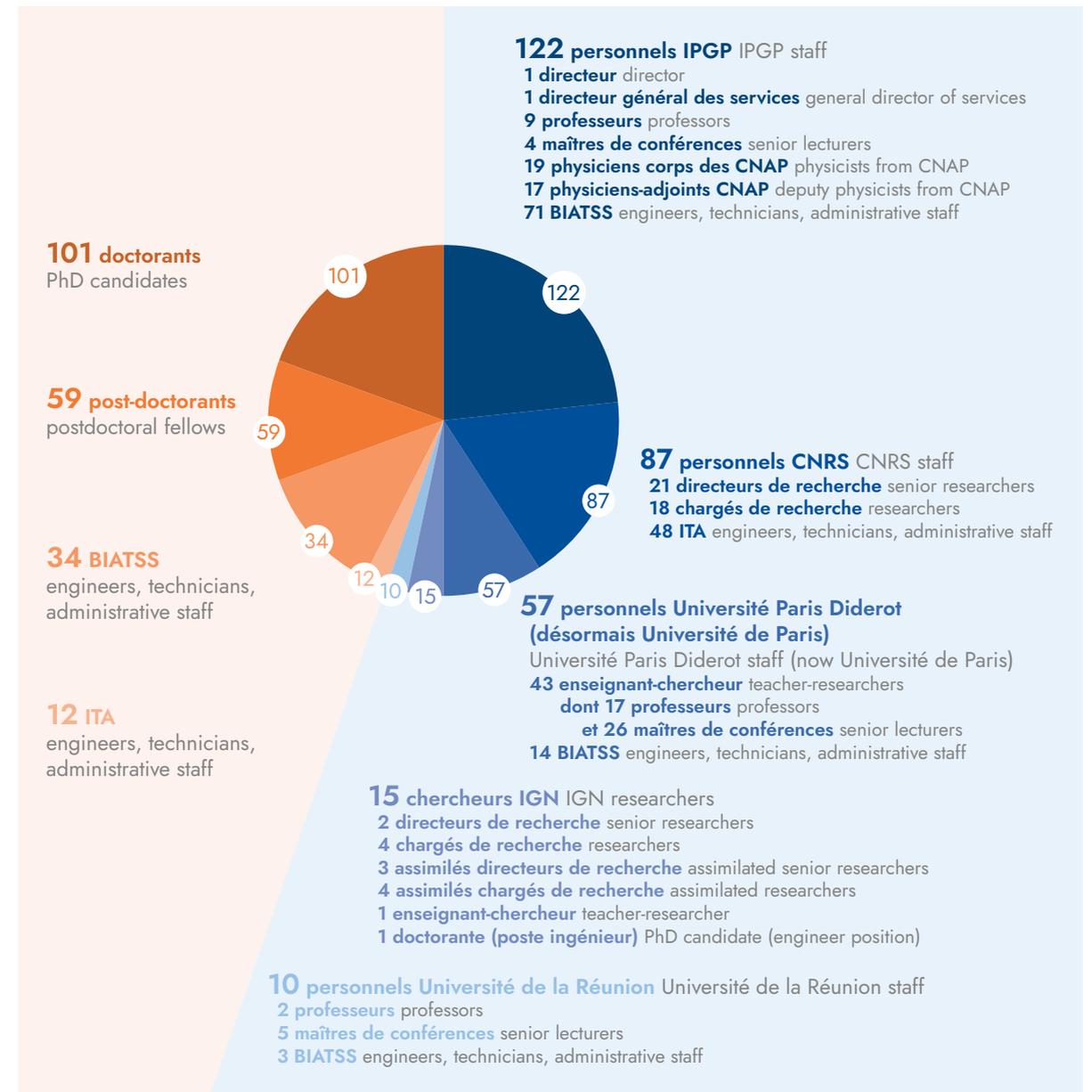
personnes en 2019 people in 2019

206

non permanents non-permanent staff

291

permanents permanent staff



101 doctorants dont + de 40% d'étrangers PhD candidates of which more than 40% are foreigners

59 post-doctorants dont + de 50% d'étrangers postdoctoral fellows which more than 50% are foreigners

53 chercheurs et professeurs invités visiting researchers and professors

Chiffres clés Key figures



100

ans en 2021 !
création de l'IPGP en 1921
years in 2021!
IPGP founded in 1921



40M€

budget total consolidé pour l'année 2019,
dont 72% de masse salariale et 23% de
ressources propres sur contrats
total consolidated budget for the year
2019, of which 72% was payroll and 23%
was own resources on contracts



4

volcans actifs français surveillés par
l'IPGP, dont celui découvert
près de Mayotte en 2019
French active volcanoes monitored
by the IPGP, including the one
discovered near Mayotte in 2019



345

publications pour l'année 2019
dont 18 dans des revues prestigieuses
telles que Nature et Science
publications for the year 2019
including 18 in prestigious journals
such as Nature and Science



300

événements environ détectés sur Mars
en un an par le sismomètre SEIS, dont une
dizaine de séismes de magnitude 3 à 4
approx. events detected on Mars in one
year by the SEIS seismometer, including
about ten earthquakes of magnitude 3 to 4



2

réseaux géophysiques mondiaux :
champ magnétique > INTERMAGNET
et activité sismique > GEOSCOPE
global geophysical networks:
magnetic field > INTERMAGNET
and seismic activity > GEOSCOPE



4

plateformes instrumentales de recherche
et services communs : PARI, S-CAPAD,
sismomètres fond de mer INSU IPGP et la
lithothèque marine IPGP créée en 2019
instrumental research platforms and
common services: PARI, S-CAPAD,
INSU-IPGP ocean-bottom seismometers and the
IPGP marine rock repository created in 2019



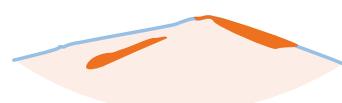
12

position de l'Université Paris-Diderot
dans le classement de Shanghai 2019
pour les Sciences de la Terre
(l'IPGP comprenant l'ensemble des sciences
de la Terre de Paris-Diderot)
position of the Université Paris-Diderot in
the Shanghai 2019 ranking for Earth
Sciences (the IPGP includes all the Earth
sciences of Paris-Diderot)



1

IdEx permettant à l'Université de Paris
de se positionner comme un des acteurs
majeurs de l'enseignement supérieur et de
la recherche
IdEx allowing Université de Paris to position
itself as one of the major players in higher
education and research



5

éruptions volcaniques du Piton de la
Fouaie à la Réunion en 2019
volcanic eruptions of the Piton de la
Fouaie on Reunion Island in 2019



9

parcours de Master différents proposés par
l'IPGP-Université de Paris
different Master's courses offered by the
IPGP-Université de Paris



53

chercheurs invités étrangers en 2019
foreign visiting researchers in 2019



Focus

Intérieur de la nouvelle lithothèque à Chambon-la-Forêt.
Inside the new rock repository in Chambon-la-Forêt.
© IPGP

Une nouvelle lithothèque marine à l'IPGP A new Marine Rock Repository at the IPGP

Les échantillons marins, dont la collecte nécessite la mise en œuvre de moyens lourds et coûteux lors de campagnes océanographiques, sont particulièrement précieux. C'est la raison pour laquelle l'IPGP a lancé la construction d'une lithothèque dédiée sur son site de Chambon-la-Forêt, pour palier à la fermeture du site de Saint-Maur où étaient jusqu'à présent stockés les échantillons provenant des campagnes mises en œuvre par les équipes de l'institut.



Reconditionnement des échantillons sur le site de Saint-Maur.
Reconditioning of samples at the Saint-Maur site.
© IPGP

Ces échantillons marins ont été reconditionnés et stockés dans des caisses standard, avec l'attribution à chacun d'un code IGSN (<http://www.igsn.org>) pour qu'ils soient identifiables dans la base de donnée internationale SESAR. Au printemps 2019, l'ensemble des échantillons marins a été déménagé dans un grand bâtiment flambant neuf de 174 m², avec un laboratoire humide attenant équipé de scies à roches. La capacité maximale de stockage ne devrait pas être atteinte avant une quinzaine d'années.

Marine samples, whose collection requires the use of heavy and costly means during oceanographic campaigns, are particularly valuable. This is why the IPGP has launched the construction of a dedicated Marine Rock Repository on its Chambon-la-Forêt site, to compensate for the closure of the Saint-Maur site where samples from the campaigns implemented by the IPGP teams were stored until now.

La lithothèque marine de l'IPGP met ainsi à la disposition de la communauté nationale et internationale, à travers le portail SESAR (<https://www.geosamples.org>), plus de 10 000 échantillons provenant essentiellement de la dorsale médio-atlantique et de l'océan Indien. Elle sera l'un des nœuds d'un réseau national de lithothèques du CNRS-INSU en cours de mise en place.

These samples were repackaged and stored in standard cases, each of which was assigned an IGSN code (<http://www.igsn.org>) so that they could be identified in the international SESAR database.

In the spring of 2019, all marine samples were moved to a large, brand new 174 m² building with an adjoining wet laboratory equipped with rock saws. The maximum storage capacity is not expected to be reached for about 15 years. The IPGP's Marine Rock Repository thus makes available to the national and international community, through the SESAR portal (<https://www.geosamples.org>), more than 10,000 samples mainly from the Mid-Atlantic Ridge and the Indian Ocean. It will be one of the nodes of a national network of CNRS-INSU rock repositories currently being set up.



En savoir plus / Read more:
<https://lithotheque.ipgp.fr>



Vie de la recherche Research life

> **Catherine Chauvel**, de l'équipe Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale (CAGE), a obtenu une ERC Advanced Grant pour son projet SHRED (Survival of Hadean Remnants in a Dynamic Mantle). Celui-ci porte sur la compréhension de l'origine de matériaux datant du début de l'histoire de la Terre dans le volcanisme intraplaque actuel. Il combine à la fois des méthodes géochimiques de pointe et des modélisations géophysiques et géodynamiques complexes, ce qui permettra de mieux cerner le fonctionnement interne de la Terre profonde.

> **Alessandro Forte**, professeur en géophysique au département des sciences géologiques de l'Université de Floride et professeur associé au département des sciences de la Terre et de l'atmosphère à l'Université de Québec, fait partie des lauréats de la troisième vague de l'appel à projet Make Our Planet Great Again (MOPGA). Il rejoint l'équipe de géomagnétisme de l'IPGP pour un projet commun intitulé GYPTIS, visant à mieux identifier les perturbations géodynamiques des marqueurs climatiques.

> **Pierdavide Coïsson et Gauthier Hulot**, de l'équipe Géomagnétisme, ont obtenu un financement ESA pour leur projet ILGEW (Investigating Lighting-Generated ELF Whistler to improve ionospheric models) en collaboration avec l'Institut of Atmospheric Physics de Prague et l'université AGH de Cracovie. Ce projet analyse la propagation des signaux magnétiques aux fréquences extrêmement basses générés par les éclairs et produisant des siffleurs dans l'ionosphère terrestre. Ces siffleurs sont détectés par les instruments ASM du CEA-Léti, fourni par le CNES et dont l'IPGP a la responsabilité scientifique à bord des satellites de la mission ESA Swarm. Le but est de contraindre le milieu ionosphérique pour valider et améliorer les modèles de l'état de l'ionosphère.

> **Catherine Chauvel**, from the Cosmochemistry, Astrophysics and Experimental Geophysics (CAGE) team, received an ERC Advanced Grant for her SHRED project (Survival of Hadean Remnants in a Dynamic Mantle). This project focuses on understanding the origin of materials from Earth's early history in current intraplate volcanism. It combines state-of-the-art geochemical methods with complex geophysical and geodynamic modelling to better understand the inner workings of the deep Earth.

> **Alessandro Forte**, Professor of Geophysics in the Department of Geological Sciences at the University of Florida and Associate Professor in the Department of Earth and Atmospheric Sciences at the Université de Québec, is one of the winners of the third wave of the Make Our Planet Great Again (MOPGA) call for projects. He joins the IPGP Geomagnetism team for a joint project called GYPTIS, which aims to better identify geodynamic disturbances in climate markers.

> **Pierdavide Coïsson and Gauthier Hulot** of the Geomagnetism team have obtained ESA funding for their ILGEW project (Investigating Lighting-Generated ELF Whistler to improve ionospheric models) in collaboration with the Institute of Atmospheric Physics in Prague and AGH University in Krakow. This project analyses the propagation of extremely low frequency magnetic signals generated by lightning and producing whistles in the Earth's ionosphere. These whistles are detected by CEA-Léti's ASM instruments, provided by the CNES and for which the IPGP has scientific responsibility on board the ESA Swarm mission satellites. The aim is to constrain the ionospheric environment in order to validate and improve models of the state of the ionosphere.



Prolongation du LabEx UnivEarthS Extension of the UnivEarthS LabEx

Le Laboratoire d'Excellence UnivEarthS est un programme de recherche dédié au développement de projets interdisciplinaires dans les domaines des sciences de la Terre et de la physique de l'Univers. Porté par Université de Paris, le LabEx rassemble du personnel scientifique issu de l'IPGP, des laboratoires APC (UP / CNRS / CEA / Observatoire de Paris) et AIM (CEA / CNRS / UP), ainsi que de l'ONERA.

Son objectif est de mieux comprendre l'origine et l'évolution des processus qui ont modelé l'histoire de la Terre et de l'Univers. Les thématiques abordées vont de l'organisation des structures de l'Univers au développement de systèmes planétaires en général, en particulier de la Terre, en passant par l'étude des phénomènes géologiques ou astrophysiques violents.

Financé par l'ANR dans le cadre du Programme d'investissement d'avenir, le LabEx a été doté, depuis son lancement en 2011, de 9 millions d'euros et a permis, entre autres, de financer une trentaine de projets scientifiques et de soutenir plusieurs actions de formation. En 2019, le LabEx UnivEarthS a été prolongé pour encore cinq ans, suite à l'évaluation positive de l'ANR.

8 projets soutenus par l'ANR 8 projects supported by the ANR

> **MAGIS, Mars Goephysical InSight**

Renforcement du retour scientifique de la mission InSight focalisé sur 6 objectifs : structure interne de Mars, analyse des données, interprétation minéralogique et géodynamique, physique des sources sismiques,

The UnivEarthS Laboratory of Excellence is a research programme dedicated to the development of interdisciplinary projects in the fields of Earth sciences and the physics of the Universe. Led by Université de Paris, the LabEx brings together scientific personnel from the IPGP, the APC (UP / CNRS / CEA / Observatoire de Paris) and AIM (CEA / CNRS / UP) laboratories, and ONERA.

Its objective is to better understand the origin and evolution of the processes that have shaped the history of the Earth and the Universe. The themes addressed range from the organisation of the structures of the Universe to the development of planetary systems in general, and the Earth in particular, through the study of violent geological or astrophysical phenomena.

Funded by the ANR as part of the Investments for the Future programme, the LabEx has been endowed, since its launch in 2011, with €9 million and has made it possible, among other things, to finance some 30 scientific projects and support several training initiatives. In 2019, the UnivEarthS LabEx was extended for another five years, following a positive evaluation by the ANR.



> **MAGIS, Mars Goephysical InSight**

Strengthening the scientific feedback of the InSight mission focused on 6 objectives: Mars Interior, Data analysis, mineralogy and geodynamic interpretation, seismic source physics, Atmosphere/Interior seismic coupling

couplage atmosphère/intérieur et développement de nouvelles pédagogies en sciences physiques.

Coordination IPGP, porté par Philippe Lognonné de l'équipe de Planétologie et sciences spatiales.

> COYOTTES, Comores et Mayotte : volcanisme, tectonique et sismicité

Compréhension de l'évolution de la déformation sismique, volcanique et géodésique, mais aussi le contexte géodynamique du canal Nord-Mozambique, y compris la cinématique et la caractéristique des structures lithosphériques et crustales, à court et long termes, ainsi qu'aux échelles régionale et locale.

Coordination BRGM, porté à l'IPGP par Nathalie Feuillet de l'équipe Géosciences marines.

> REVEARTH, Modélisation réaliste des inversions du champ magnétique terrestre

Amélioration du code permettant de réaliser des simulations réalistes des inversions de polarité afin de parvenir à élucider les mécanismes sous-jacents et à caractériser la forme et l'intensité du champ magnétique lors d'une inversion, ainsi que son effet sur la société et ses services. Combinaison des observations et simulations via assimilation de données pour produire un modèle réduit réaliste de basse dimension pour les inversions et excursions géomagnétiques.

Coordination ISTERRE, porté à l'IPGP par Thomas Gastine de l'équipe de Géomagnétisme.

> PHOSTORE, Piégeage du phosphore : contribution des bactéries magnétotactiques dans les zones de transition oxiqne-anoxique

Il a été mis en évidence récemment que des bactéries magnétotactiques (MTB) de la famille des Magnetococcaceae accumulaient abondamment des polyphosphates intracellulaires (PolyP) à l'interface oxiqne-anoxique dans la colonne d'eau du lac Pavin (ferrugineux).

Ce projet propose la mise en place d'un consortium pluridisciplinaire afin d'identifier (i) les souches de MTB particulièrement efficaces dans l'accumulation de PolyP, (ii) la dynamique de ce réservoir et l'impact des MTB sur le cycle du P dans le lac Pavin, par leur incorporation active de P dans la biomasse ou par biominéralisation, et (iii) les déterminants génétiques et environnementaux de ces processus.

Coordonné par Sorbonne Université, porté à l'IPGP par Didier Jézéquel de l'équipe de Biogéochimie environnementale.

and development of new educational approach in physical sciences.

IPGP coordination, led by Philippe Lognonné of the Planetology and Space Sciences team.

> COYOTTES, Comoros and Mayotte: volcanism, tectonics and seismicity

Understanding the evolution of the seismic, volcanic and geodetic deformation, but also on the geodynamic context, including the kinematics and the characterization of the lithospheric and crustal structures, in both short and long terms, and regional and local scales.

BRGM coordination, led to the IPGP by Nathalie Feuillet of the Marine Geosciences team.

> REVEARTH, Realistic modelling for Earth's magnetic field reversals

Improvement of the simulation code allowing realistic simulations of polarity reversals in order to elucidate the underlying mechanisms and to characterize the typical magnetic field shape and intensity during a reversal, and to estimate the societal consequences of a reversal. Combination of observations and simulations via data assimilation to produce a realistic reduced, low-dimensional, model of geomagnetic reversals and excursions.

ISTERRE coordination, led to the IPGP by Thomas Gastine of the Geomagnetism team.

> PHOSTORE, Phosphorus sequestration: contribution of magnetotactic bacteria in oxic-anoxic transition zones

It has recently been evidenced that magnetotactic bacteria (MTB) affiliated to the Magnetococcaceae family strongly accumulate intracellular polyphosphates at the oxic-anoxic transition zone in the water column of the ferruginous Lake Pavin. This project proposes here to gather a multidisciplinary consortium, in order to identify (i) MTB strains particularly efficient in the accumulation of polyphosphates, (ii) the dynamic of this reservoir and the impact of MTB on the P cycle in Lake Pavin, by their active storage of P in the biomass or by favoring the precipitation of phosphate mineral phases, and (iii) the genetic and environmental determinants of these processes.

Coordinated by Sorbonne Université, led to the IPGP by Didier Jézéquel of the Environmental Biogeochemistry team.

> MEGAMU, Caractérisation temporelle haute résolution des processus géothermiques utilisant conjointement l'ERT, la gravimétrie et la muographie

Mesure de phénomènes géothermaux avec une résolution spatiale et temporelle sans précédent grâce aux données récoltées par une combinaison de méthodes bien connues des géophysiciens (méthodes sismiques, gravimétriques et à courant continu) avec une technique émergente, la tomographie muonique, qui vont pouvoir se contraindre les unes les autres.

Coordonné par IRIS, porté à l'IPGP par Michel Diament de l'équipe de géodésie.

> MICROPRONY, Fonctionnement de l'écosystème microbien du système hydrothermal alcalin de Prony, Nouvelle Calédonie

Compréhension du fonctionnement de l'écosystème microbien associé à un système hydrothermal unique situé en baie de Prony (Nouvelle-Calédonie) par une approche pluridisciplinaire : métagénomique, géochimie isotopique, micro-imagerie et de modélisation thermodynamique.

Coordination de l'Institut Méditerranéen d'Océanologie, porté à l'IPGP par Emmanuelle Gérard de l'équipe de Géomicrobiologie.

> MONIDAS, Utilisation des capteurs acoustiques distribués (DAS) pour la surveillance des risques naturels

Développement et application de la technologie DAS (Distributed Acoustic Sensing), qui mesure la déformation longitudinale d'une fibre optique de télécommunication standard, à la surveillance et à la réduction des risques sismiques, volcaniques et des glissements gravitaires.

Coordination ISTERRE, porté à l'IPGP par Jean-Philippe Metaxian de l'équipe de sismologie.

> PERMOLARDS, Les molards, marqueurs de l'évolution de la dégradation du pergélisol de montagne

Caractérisation complète de la formation, de l'évolution et de la longévité des molards (cônes de débris issus de la dégradation de blocs gelés déplacés par un mouvement de terrain) et établissement de critères pour leur reconnaissance par télédétection via une approche pluridisciplinaire intégrant analyses de terrain, méthode innovante de datation par luminescence, simulations en laboratoire et numériques, et télédétection.

Coordination du laboratoire de planétologie et géodynamique, porté à l'IPGP par Antoine Lucas de l'équipe de planétologie et sciences spatiales.

> MEGAMU, High-resolution monitoring of geothermal processes with joined Electrical resistivity, Induced & Spontaneous polarization, Gravimetry and Muon tomography

Measurement of geothermal phenomena with unprecedented spatial and temporal resolution using data collected by a combination of well-known geophysical methods (seismic, gravimetric and DC methods) with an emerging technique, muon tomography, which will allow them to constrain each other.

Coordinated by IRIS, led to the IPGP by Michel Diament of the Geodesy team.

> MICROPRONY, MICRObial ecosystem functioning in the serpentinizing-hydrothermal system of PRONY, New Caledonia

Deciphering functioning of the microbial ecosystem associated with a unique serpentinizing-hydrothermal system located in the Bay of Prony (New Caledonia) by integrating multidisciplinary methods: metagenomics, isotopic geochemistry, microimaging, and thermodynamic modeling.

Coordination of the Mediterranean Institute of Oceanology, led to the IPGP by Emmanuelle Gérard of the Geomicrobiology team.

> MONIDAS, Natural hazard monitoring using Distributed Acoustic Sensing (DAS)

Development and application of DAS (Distributed Acoustic Sensing) technology, which measures the longitudinal strain of a standard telecommunication optical fiber, to monitor seismic, volcanic and landslide natural hazards.

ISTERRE coordination, led to the IPGP by Jean-Philippe Metaxian of the Seismology team.

> PERMOLARDS, Tracking the degradation of mountain permafrost with molards

Complete characterization of the formation, evolution and longevity of molards (cones of debris resulting from the disaggregation of cemented blocks transported by landslides) and establishment of criteria for their recognition by remote sensing via a multidisciplinary approach integrating fieldwork, a novel type of luminescence dating, laboratory and numerical simulations and remote sensing analysis.

Laboratory of planetology and geodynamics coordination, led to the IPGP by Antoine Lucas from the Planetology and Space Sciences team.



Prix et distinctions Awards and honours



Patrick Allard

Systèmes volcaniques / Volcanic Systems

Président de l'IAVCEI
President of the IAVCEI



Zuheir Altamimi

IGN / IGN

Président de l'Association internationale de géodésie (IAG)
« Fellow » de l'American Geophysical Union
President of the International Association of Geodesy (IAG)
American Geophysical Union Fellow



François Beauducel

Sismologie / Seismology

Chevalier dans l'Ordre des Palmes Académiques
Knight in the Order of the Academic Palms



Mathilde Cannat

Géosciences marines / Marine Geosciences

Médaille Stephan Mueller de l'EGU
Stephan Mueller Medal of the EGU



Raphaël Grandin

Tectonique et mécanique de la lithosphère /
Lithosphere tectonics and mechanics

Prix John Wahr Early Career de l'AGU 2019
John Wahr Early Career Award of the AGU 2019



Gauthier Hulot

Géomagnétisme / Geomagnetism

Prix Edward Bullard Lecture de l'AGU 2019
Edward Bullard Lecture Award of the AGU 2019



Robin Lacassin

Tectonique et mécanique de la lithosphère /
Lithosphere tectonics and mechanics

Outstanding Reviewer 2018 de l'AGU
AGU's Outstanding Reviewers of 2018



Angèle Laurent

Sismologie / Seismology

**Prix du meilleur poster étudiant lors
des 4^e Rencontres scientifiques et techniques RESIF 2019**
Award of the best student poster
at the 4th RESIF 2019 Scientific and Technical Meetings



Charles Lelosg

Géomatériaux / Geomaterials

Chaire d'excellence d'Université de Paris
Chair of Excellence of Université de Paris



Daniel Neuville

Géomatériaux / Geomaterials

« Fellow » de la Mineralogical Society of America
Mineralogical Society of America Fellow



Ke Zhu

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

Prix Wiley et Prix O. Richard Norton de la Meteoritical Society
Wiley Award and O. Richard Norton Award of the Meteoritical Society





Nouveaux chercheurs et enseignants-chercheurs New researchers and teachers-researchers



Charles Le Losq

Charles Le Losq obtient son doctorat en géophysique à l'IPGP - Université Paris-Diderot en 2012. Il gagne un Postdoctoral Fellowship pour mener des recherches au Geophysical Laboratory (Carnegie Institution for Science, Washington DC) entre 2013 et 2015. Il intègre ensuite la Research School of Earth Sciences (Australian National University) à Canberra, Australie, où il travaillera pendant 4 ans en tant que Research Fellow. Suite à cette expérience, il intègre l'IPGP en septembre 2019 en tant que maître de conférence. Il développe des recherches sur la rhéologie et la minéralogie des magmas, les éléments volatils, l'utilisation du machine learning en géochimie, ou encore la mise en place de modèles généraux des propriétés des géomatériaux.

Charles Le Losq obtained his PhD in geophysics at IPGP - Université Paris-Diderot in 2012. He wins a Postdoctoral Fellowship to conduct research at the Geophysical Laboratory (Carnegie Institution for Science, Washington DC) between 2013 and 2015. He then joined the Research School of Earth Sciences (Australian National University) in Canberra, Australia, where he worked for 4 years as a Research Fellow. Following this experience, he joined the IPGP in September 2019 as a lecturer. It develops research on the rheology and mineralogy of magmas, volatile elements, the use of machine learning in geochemistry, and the establishment of general models of the properties of geomaterials.

 **Contact :** lelosq@ipgp.fr



Baptiste Debret

Baptiste Debret obtient son doctorat en pétrologie métamorphique au laboratoire Magmas et Volcans de Clermont-Ferrand fin 2013. Il part ensuite travailler en Angleterre, d'abord à l'Université de Durham (2014-2016) puis de Cambridge (2016-2017), pour commencer sa recherche postdoctorale en géochimie des isotopes stables. En 2017, il obtient une bourse du Fond National de la Recherche Scientifique belge pour continuer son travail à l'Université Libre de Bruxelles. Il intègre l'IPGP en 2019 en tant que chercheur postdoctoral avant d'être nommé chargé de recherche CNRS à l'IPGP. Son travail concerne le cycle du fer, du soufre, du carbone, des métaux (ex : Zn, Cu) et des éléments mobiles dans les fluides (ex : B, Li, Cl, F...) lors des interactions fluides/roches entre l'hydrosphère et la lithosphère océanique aux dorsales et lors de la déshydratation de la plaque plongeante dans les zones de subduction.

Baptiste Debret completed his PhD in metamorphic petrology at the Laboratoire Magmas & Volcans (Clermont-Ferrand). Subsequently, he held a postdoctoral research associate position in England for three years, first at Durham University and then at the University of Cambridge, where he worked on stable isotope geochemistry. In 2017, he obtained a 3-year fellowship funded by the Belgium "Fond National de la Recherche Scientifique" to carry out independent research at the Université Libre de Bruxelles. He joined the IPGP in 2019 as a postdoctoral research associate until he was appointed "Chargé de Recherche CNRS" at the IPGP. His work concerns the cycling of iron, sulfur, carbon and economically important elements, such as Zn and Cu, during fluid/rock interactions occurring between the hydrosphere and the oceanic crust at mid-oceanic ridges and during the dehydration of the plunge plate in the subduction zones.

 **Contact :** debret@ipgp.fr



© Marina Rosas-Carbajal

Marina Rosas-Carbajal

Marina Rosas Carbajal obtient son doctorat en sciences de la Terre et de l'environnement à l'Université de Lausanne (Suisse) en 2014, après avoir obtenu son diplôme de géophysicienne à l'Université nationale de La Plata (Argentine). Elle est ensuite lauréate de trois bourses postdoctorales consécutives du Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS), puis d'une bourse du Fonds AXA pour la Recherche, pour travailler à l'IPGP afin d'étudier le volcan La Soufrière de Guadeloupe. Ses recherches portent sur le développement des systèmes hydrothermaux du volcan et leur influence sur le transport interne de chaleur et de fluides. Elle utilise des méthodes électriques et la tomographie par muons pour scanner l'intérieur des volcans, ainsi que la modélisation numérique pour comprendre leur dynamique et leurs dangers potentiels.

Marina Rosas Carbajal received her PhD in Earth and Environmental Sciences from the University of Lausanne (Switzerland) in 2014, after graduating as a Geophysicist from the National University of La Plata (Argentina). She then obtained three consecutive postdoctoral fellowships from the Swiss National Science Foundation, and one grant from the AXA Research Fund, to work at the IPGP to study the volcano "La Soufrière de Guadeloupe". Her research focuses on how volcano hydrothermal systems develop, and how they influence heat and fluid transport in the volcano. She uses electrical methods and muon tomography to scan the interior of volcanos, and numerical modelling to understand the volcano dynamics and potential hazards.



Contact : rosas@ipgp.fr



© IPGP

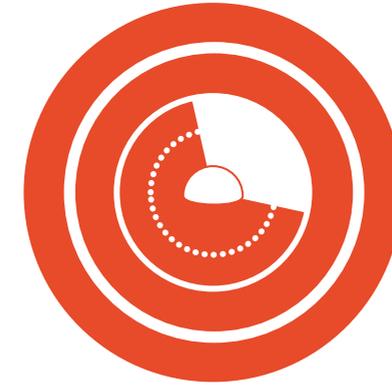
Yohan Guyodo

Yohan Guyodo obtient en décembre 2001 son doctorat en sciences géologiques de l'Université de Floride (États-Unis), traitant des variations temporelles du champ paléomagnétique enregistré par les sédiments marins. De janvier 2002 à octobre 2003, il est chercheur associé à l'université du Minnesota (Etats-Unis), au sein de l'Institut of Rock Magnetism, où il étudie les propriétés magnétiques à basse température de différents oxyhydroxydes de fer. En 2003, il est recruté par le CNRS en tant que chargé de recherche, affecté au LSCE à Gif-sur-Yvette, pour y mener des recherches sur les nano-oxydes de fer. L'évolution de ses thématiques de recherche l'amène à changer d'affectation pour intégrer, en 2008, l'IMPMC (Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie - Paris), afin de travailler sur les altérations des oxydes et hydroxydes de fer dans les sols et sédiments, notamment en lien avec l'activité microbienne. Il obtient son HDR en 2013 de l'Université Paris Diderot. En avril 2019, il rejoint l'équipe de paléomagnétisme de l'IPGP, où il mène des recherches sur l'acquisition et l'altération du signal paléomagnétique dans les séries sédimentaires continentales.

Yohan Guyodo received his PhD in geological sciences in December 2001 from the University of Florida (USA), dealing with the paleomagnetic field time variations recorded by marine sediments. From January 2002 to October 2003, he was an associate researcher at the University of Minnesota (USA), working at the Institute of Rock Magnetism on the low-temperature magnetic properties of various iron oxyhydroxides. In 2003, he was hired by the CNRS as a researcher, assigned to the LSCE in Gif-sur-Yvette, to conduct research on nano iron-oxides. The evolution of his research themes led him to integrate IMPMC (Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie - Paris) in 2008, where he studied the weathering of iron oxides and hydroxides in soils and sediments, with emphasis on the microbial activity. He received his "Habilitation" from the Université Paris Diderot in 2013. In April 2019, he joined the IPGP to conduct research on the acquisition and modification of the paleomagnetic signal in continental sediments.

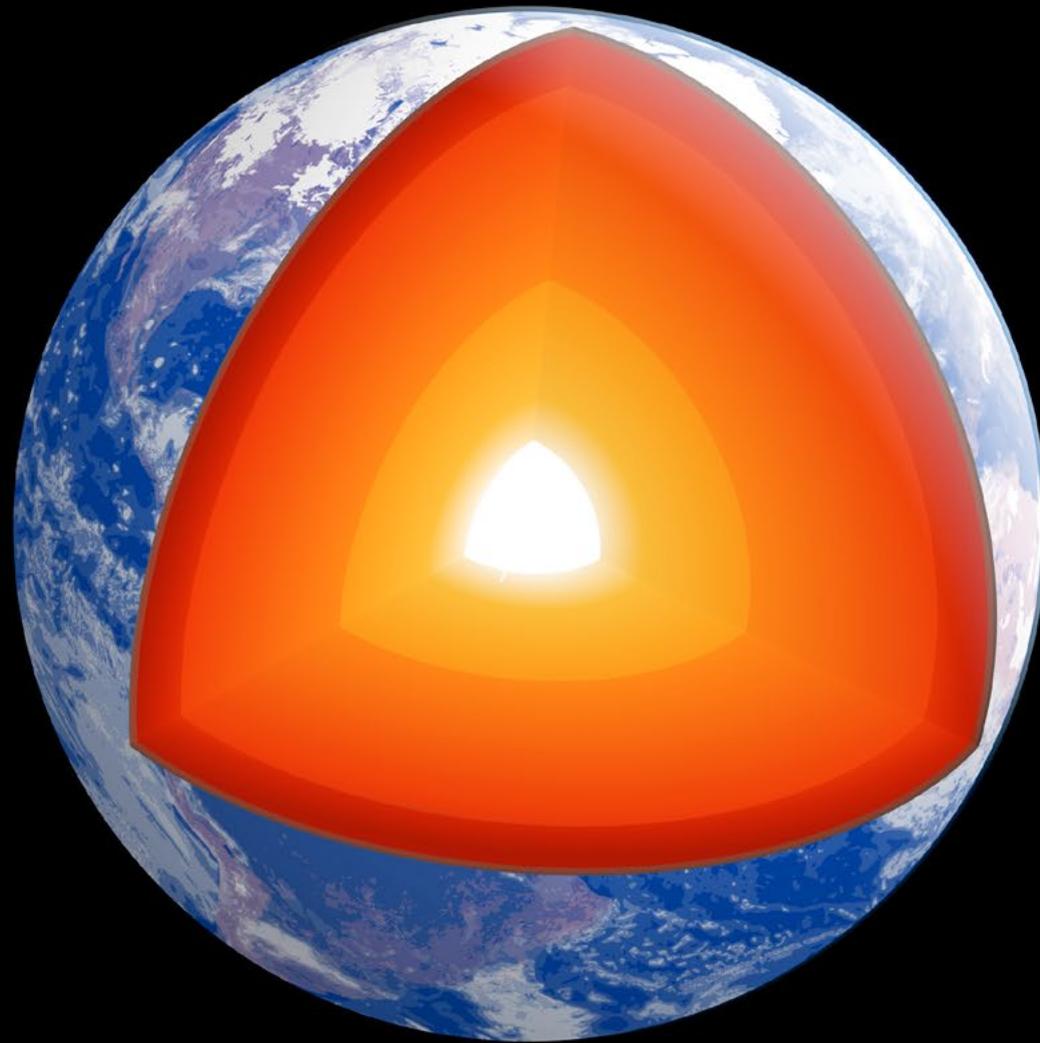


Contact : yohan.guyodo@ipgp.fr



Intérieurs de la Terre et des planètes

Earth and planetary interiors



Les processus physico-chimiques intervenant à l'intérieur de la Terre sont responsables de multiples phénomènes observables à sa surface, tels que l'activité tellurique et volcanique ou encore l'existence du champ magnétique. La dynamique interne d'une planète détermine son évolution au cours des temps géologiques et sa compréhension nécessite une recherche pluridisciplinaire et le déploiement d'innovations technologiques de pointe. Ainsi, un sismomètre développé à l'IPGP pour équiper la sonde Insight transmet désormais les données sismiques d'une autre planète : Mars.

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. For example, a seismometer developed at the IPGP to equip the Insight probe now transmits seismic data from another planet: Mars.

#1

Point chaud de La Réunion : fluage de l'asthénosphère et connexion avec la ride centrale indienne

Large-scale flow of Indian Ocean asthenosphere driven by Réunion plume

Le point chaud de La Réunion abrite un des volcans intraplaques les plus actifs au monde, le Piton de la Fournaise. Une chaîne volcanique, désormais éteinte, relie ce point chaud aux Trapps du Deccan en Inde, un important plateau de roche basaltique continental formé il y a 65 millions d'années. En dépit d'un certain consensus sur le fait que le point chaud de La Réunion soit alimenté par un panache mantellique, de nombreuses questions font encore débat, telles que l'interaction entre le panache et la lithosphère océanique et son possible étalement vers la ride centrale indienne (Central Indian Ridge - CIR), un secteur de dorsale océanique situé à plus de 1000 km à l'Est de l'île de La Réunion.

Afin d'étudier et d'imager ce panache mantellique, depuis le manteau inférieur jusqu'à la surface, le projet scientifique franco-allemand RHUM-RUM (Réunion Hotspot and Upper Mantle - Réunions Unterer Mantel) a déployé 57 sismomètres de fond de mer (Ocean Bottom Sismometers) large bande, pour une durée de 13 mois et 20 stations à terre pendant plus de deux ans. Cet ambitieux dispositif a permis de mesurer le déphasage des ondes de cisaillement et d'utiliser les ondes de surface pour imager les structures et contraindre l'anisotropie sur une vaste région du manteau supérieur.

The Réunion hotspot is one of the most active sites of intraplate volcanism and its volcanic track leads to a major flood basalt province, the Deccan Traps in India, formed 65 Ma ago. Many questions are still open concerning the mantle plume that feeds the hotspot and concerning how plume material, once at sublithospheric depths, interacts with the overlying moving tectonic plate and could spread as far as the Central Indian Ridge (CIR), located more than 1000 km to the East.

In order to understand plume-ridge interaction and the global upper mantle flow around La Réunion, the French-German RHUM-RUM experiment (Réunion Hotspot and Upper Mantle - Réunions Unterer Mantel) deployed 57 broadband ocean-bottom seismometers for 13 months, and 20 island stations for more than two years. This ambitious seismological survey enabled to perform both shear-wave splitting measurements and anisotropic Rayleigh-wave tomography.

The high lateral resolution (~ 50 km) of SKS splitting measurements show substantial splits (1-2s), and indicate the existence of a 100-150 km thick asthenospheric layer flowing eastward towards the Central Indian Ridge. Rayleigh-wave tomography provides seismic anisotropy as a function of depth, which constitutes a proxy for

upper mantle flow. The results show a dominant west-east anisotropy direction, in contrast to the northeastward motion of the overlying Somali and Indian plates.

Guilhem Barruol and his colleagues provide a new view on hotspot-ridge interaction and on the plume flow in the uppermost mantle, by revealing a large scale asthenospheric, plume-fed reservoir over an unexpectedly broad area beneath the Mascarene Basin. These important results provide a robust framework to understand how the plume geochemical fingerprint might be found in distant mid-oceanic ridge basalts.

Guilhem Barruol et ses collègues apportent un nouveau regard sur l'interaction panache mantellique - dorsale océanique, en révélant un écoulement à grande échelle spatiale sous le bassin des Mascareignes, alimenté par un panache. Ces résultats significatifs fournissent un cadre solide pour comprendre comment la signature géochimique d'un panache peut se retrouver au niveau de dorsales médio-océaniques lointaines.

Guilhem Barruol et ses collègues apportent un nouveau regard sur l'interaction panache mantellique - dorsale océanique, en révélant un écoulement à grande échelle spatiale sous le bassin des Mascareignes, alimenté par un panache. Ces résultats significatifs fournissent un cadre solide pour comprendre comment la signature géochimique d'un panache peut se retrouver au niveau de dorsales médio-océaniques lointaines.



Ref : Barruol, G., Sigloch, K., Scholz, J. et al. *Large-scale flow of Indian Ocean asthenosphere driven by Réunion plume.* *Nat. Geosci.* 12, 1043–1049 (2019). DOI: 10.1038/s41561-019-0479-3 **Contact :** barruol@ipgp.fr

#2

La rhéologie et l'histoire thermique de Mars révélées par l'évolution orbitale de son satellite Phobos

The rheology and thermal history of Mars revealed by the orbital evolution of its satellite Phobos

À la différence de sa surface que l'on connaît désormais relativement bien, les détails de la structure interne de Mars et de son évolution restent mal connus. Les indices d'une activité volcanique récente suggèrent que l'intérieur profond de la planète rouge reste chaud et se refroidit par convection. Sa vitesse de refroidissement est liée à son état thermique initial et à sa rhéologie qui détermine sa capacité à se déformer et à évoluer de manière dynamique. Ainsi, l'étude de l'évolution thermique de Mars, combinée aux observations disponibles, permet de reconstruire son histoire dynamique et sa structure actuelle. Toutefois, une telle approche est limitée par les interdépendances de plusieurs grandeurs clés faiblement contraintes, comme la température, la composition et la rhéologie.

Unlike its surface that we know relatively well, the structure of the interior of Mars and its evolution is poorly constrained. A possible recent volcanic activity suggests that the red planet remains hot and convectively cooling. The cooling rate of Mars is related to its early thermal state and to its rheology, which determines its ability to deform and to dynamically evolve. Also, the study of the thermal evolution of Mars, combined with available surface observations, allows us to reconstruct its dynamic history and its current structure. However, such an approach is limited by the cross-talks between several key quantities, such as temperature, composition and rheology.

Une équipe de chercheurs de l'institut de physique du globe de Paris et du Jet Propulsion Laboratory révèle,

A team of researchers from the Institut de physique du globe de Paris and the Jet Propulsion Laboratory reveals that it is possible to better understand the thermal history and the rheology of Mars, by considering its nearest satellite, Phobos, as reported in an article published in

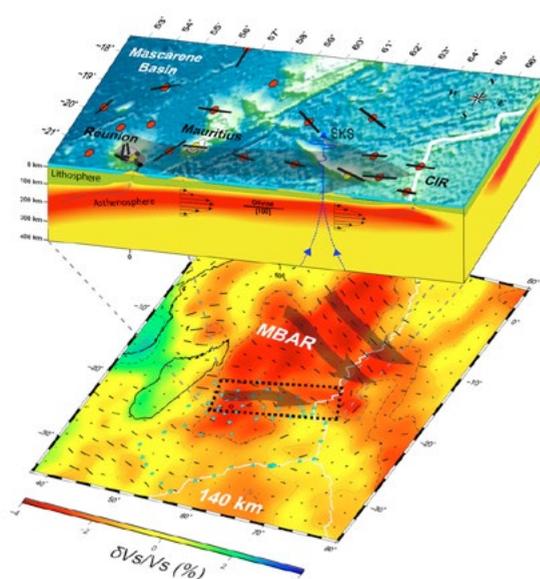


Schéma du fluage asthénosphérique sous le SW de l'Océan Indien. Le bloc diagramme illustre le fluage depuis la Réunion vers la ride centrale indienne (CIR) qui aligne les cristaux d'olivine et crée l'anisotropie sismique. A la surface, les cercles rouges indiquent la position des OBS et les segments noirs les déphasages des ondes SKS. Dessous est présentée la carte de vitesses des ondes de cisaillement et leur anisotropie à la profondeur de 140 km. Les flèches grises indiquent le chenal de fluage asthénosphérique superficiel entre le point chaud et la CIR mais également le fluage asthénosphérique plus profond et plus large sous le bassin des Mascareignes, vers et au-delà de la CIR.

Conceptual summary of shallow and deep flows in the asthenosphere beneath the western Indian Ocean: the block diagram shows a shallow asthenospheric channel from Réunion towards the CIR that aligns the olivine [100] fast axes east-west and generate the seismic anisotropy. Red dots are OBS locations and black bars are SKS splitting measurements. The lower map shows isotropic and anisotropic shear velocities at 140 km depth. Grey arrows highlight the shallow, hotspot-to-CIR flow in the Rodrigues corridor asthenosphere, and the deeper, broader flows within the Mascarene asthenosphere, towards and beyond the CIR.

© IPGP - Barruol

dans un article paru dans la revue Nature, qu'il est possible de mieux comprendre l'histoire thermique et la rhéologie de Mars en considérant son satellite le plus proche, Phobos, dont l'évolution orbitale est régie par l'histoire thermochimique de la planète rouge, par le biais des interactions de marées. En exploitant ces relations, les scientifiques ont constaté que Mars était à l'origine légèrement plus chaude qu'aujourd'hui (100 à 200 K) et que son manteau se déformait lentement sous le régime de fluage par dislocation. Cela correspond à une viscosité de référence de $10^{22.2 \pm 0.5}$ Pa.s et à une sensibilité intrinsèque de viscosité à la température modérée à relativement faible (énergie d'activation de 280 ± 80 kJ/mol) et à la pression (volume d'activation < 14 cm³/mol). Leur approche prédit une épaisseur moyenne de la croûte martienne de 40 ± 25 km et un flux de chaleur en surface de 20 ± 1 mW/m². La comparaison de ces prévisions avec les données à venir pourrait réduire ces incertitudes thermiques et rhéologiques.



Nature. Phobos's orbital evolution is governed by the thermochemical history of the red planet through tidal interactions. It is thus through the analysis of these relationships that the scientists have found that Mars was originally slightly warmer than today (100 to 200 K) and that its mantle slowly deformed under the dislocation creep regime. This corresponds to a reference viscosity of $10^{22.2 \pm 0.5}$ Pa.s and to a moderate to relatively weak intrinsic sensitivity of viscosity to temperature (activation energy of 280 ± 80 kJ/mol) and pressure (activation volume of < 14 cm³/mol). Their approach predicts an average thickness of the Martian crust of 40 ± 25 km and a surface heat flux of 20 ± 1 mW/m². Comparing these predictions with the data from future and ongoing space missions, such as InSight, could reduce uncertainties in Martian thermal and rheological histories.



Ref : Samuel, H., Lognonné, P., Panning, M. & Lainey, V., *The rheology and thermal history of Mars revealed by the orbital evolution of Phobos*, *Nature* 569, 523–527 (2019). DOI: 10.1038/s41586-019-1202-7
Contact : samuel@ipgp.fr

Satellite le plus proche de Mars, Phobos, pris en photo par la sonde spatiale Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) en 2008
Closest satellite to Mars, Phobos, captured by the space probe Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) in 2008
© NASA

#3

Les secousses géomagnétiques enfin reproduites et expliquées Geomagnetic jerks finally reproduced and explained

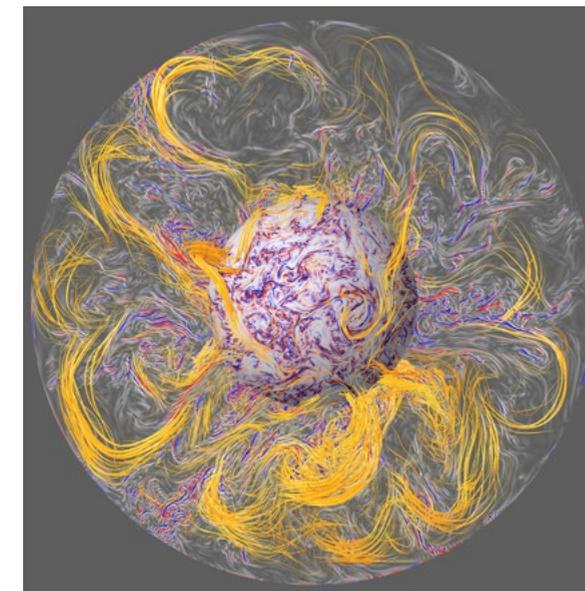
L'une des caractéristiques intrinsèques du champ magnétique terrestre réside dans sa variabilité sur des échelles de temps très différentes, allant de plusieurs siècles à seulement quelques années. Les secousses géomagnétiques, qui se traduisent par un changement brusque de la dérivée seconde du champ magnétique par rapport au

A key feature of the Earth's magnetic field is its time variability over a broad range of time scales, from centuries or longer, to a few years, or less. Geomagnetic jerks (defined as an abrupt change in the second time derivative of the Earth's magnetic field) represent the fastest time variations of the field. Jerks have been observed by

temps, représentent les variations les plus rapides. Ces secousses ont déjà été observées par certains satellites et observatoires terrestres mais leur prévision reste difficile à réaliser, limitant ainsi notre capacité à prédire correctement l'évolution du champ magnétique de la Terre.

La prévision de ces secousses (appelées « jerks ») nécessite de comprendre leur origine et le lien de causalité entre elles et les différents processus se produisant dans le noyau terrestre. Ce travail a pu être réalisé par une équipe de chercheurs de l'institut de physique du globe de Paris et de l'Université technique du Danemark, qui ont développé des simulations numériques de pointe s'approchant au plus près des conditions physiques de notre noyau (notamment une rotation rapide et des forces magnétiques importantes). Ces simulations magnétohydrodynamiques (MHD) ont ainsi permis de comparer les modélisations aux observations géomagnétiques en produisant spontanément des pulsations intermittentes, de courte durée, dans l'accélération de l'énergie magnétique à la surface terrestre. Les résultats obtenus montrent que l'intensité et la durée de ces secousses magnétiques correspondent toutes deux aux observations.

En examinant non plus la surface terrestre mais l'intérieur du noyau, les simulations mettent en évidence le rôle joué par les ondes d'Alfvén dans l'apparition des secousses magnétiques, elles-mêmes générées par des instabilités dues à des relâchements soudains de la flottabilité à l'intérieur du noyau. Lorsque ces ondes magnétohydrodynamiques s'approchent de la surface du noyau, leur énergie est concentrée vers le plan équatorial et le long des lignes de fort flux magnétique, générant des zones localisées avec de fortes accélérations magnétiques, provoquant ainsi ces fameux jerks.



satellites and ground observatories, but their occurrence cannot yet be predicted, thereby hampering our ability to correctly forecast geomagnetic field variations in the next decades.

Predicting jerks requires understanding their origin and thus unravel the causal relation between jerks and processes in the Earth's core. This was accomplished by a team of researchers from the Institut de physique du globe de Paris and the Technical University of Denmark, using cutting-edge numerical simulations of the geodynamo. Their highly performant magnetohydrodynamics simulations use a parameter space that pertains to core conditions (e.g., rapid rotation and a strong magnetic control), enabling the comparison between model results and geomagnetic observations. Importantly, the simulations spontaneously produce short-lived intermittent pulses in the magnetic acceleration energy (i.e., jerks) at the Earth's surface. The results show that both the intensity and the duration of simulated jerk events match geomagnetic observations.

If we now move from the Earth's surface down to the core interior, the simulations enable to understand that jerks are caused by the arrival of Alfvén waves, in turn generated by sudden buoyancy releases inside the core. As these magnetohydrodynamics waves approach the core surface their energy is focused towards the equatorial plane and along lines of strong magnetic flux, thereby generating localized zones with strong magnetic accelerations, causing jerks.



Ref : Aubert, J., Finlay, C.C. *Geomagnetic jerks and rapid hydromagnetic waves focusing at Earth's core surface*. *Nat. Geosci.* 12, 393–398 (2019). DOI: 10.1038/s41561-019-0355-1
Contact : aubert@ipgp.fr

Visualisation de l'intérieur du noyau terrestre, tel que modélisé dans la simulation numérique (vue du plan équatorial et d'une surface sphérique près de la graine solide, depuis le pôle Nord). Les lignes de force du champ magnétique (en orange) sont étirées par la convection turbulente (en bleu et rouge). Les ondes hydromagnétiques sont émises depuis l'intérieur du noyau et se propagent le long des lignes de force du champ, jusqu'à la surface du noyau où elles se focalisent pour créer des secousses géomagnétiques.

Visualization of the interior of the Earth's core, as modeled in numerical simulation (view of the equatorial plane and a spherical surface near the solid seed, from the North Pole). The magnetic field lines of force (in orange) are stretched by turbulent convection (in blue and red). Hydromagnetic waves are emitted from inside the core and propagate along the field lines of force to the surface of the core where they focus to create geomagnetic jerks.

© Aubert et al./IPGP/CNRS Photothèque



Risques naturels

Natural hazards

La compréhension de phénomènes naturels tels qu'éruptions volcaniques, tremblements de terre, tsunamis, glissements de terrain ou encore orages magnétiques est un enjeu majeur pour appréhender les aléas et risques associés, et de ce fait contribue au développement durable de nos sociétés. Ces phénomènes sont le résultat de processus géologiques se produisant sur des échelles de temps et d'espace variées et 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, mesures continues ou ponctuelles, éventuellement en observatoires, ou lors de campagnes en mer), des observations depuis l'espace, des études et analyses d'échantillons en laboratoire, ainsi que des modélisations théoriques, numériques ou expérimentales.

The understanding of natural phenomena such as volcanic eruptions, earthquakes, tsunamis, landslides or magnetic storms is a major challenge in quantifying hazards and associated risks, and thus contributes to the sustainable development of our societies. These phenomena are the result of geological processes occurring on various time and space scales and whose analysis covers almost all branches of the Earth Sciences. Their study at the IPGP combines field approaches (observations, continuous or punctual measurements, possibly in dedicated observatories, or during sea campaigns), observations from space, laboratory studies and sample analyses, as well as theoretical, numerical or experimental modelling.

#1

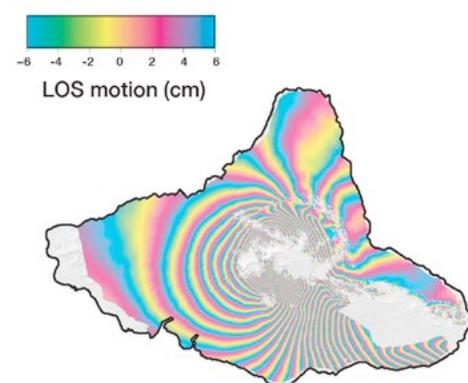
De l'important dégazage à la subsidence de la caldera du volcan Ambrym

From degassing to the subsidence of the Ambrym caldera

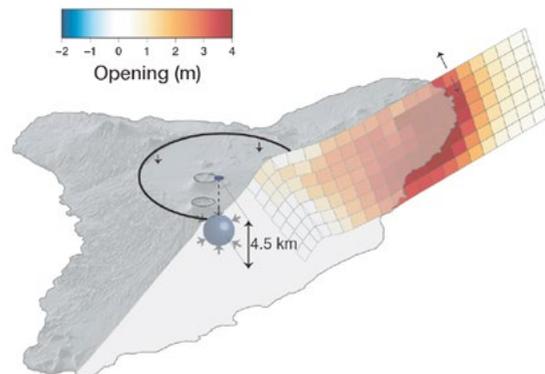
Une équipe internationale, menée par des chercheurs de l'IPGP, a combiné des observations multi-paramètres, de la sismologie à l'observation spatiale, pour révéler les mécanismes de formation silencieuse et progressive de la caldera du volcan Ambrym (Vanuatu) par des mouvements de magma en profondeur.

An international team, led by IPGP researchers, combined multi-parameter observations, from seismology to space observation, to reveal the mechanisms of silent and progressive formation of the caldera of the Ambrym volcano (Vanuatu) produced by deep magma movements.

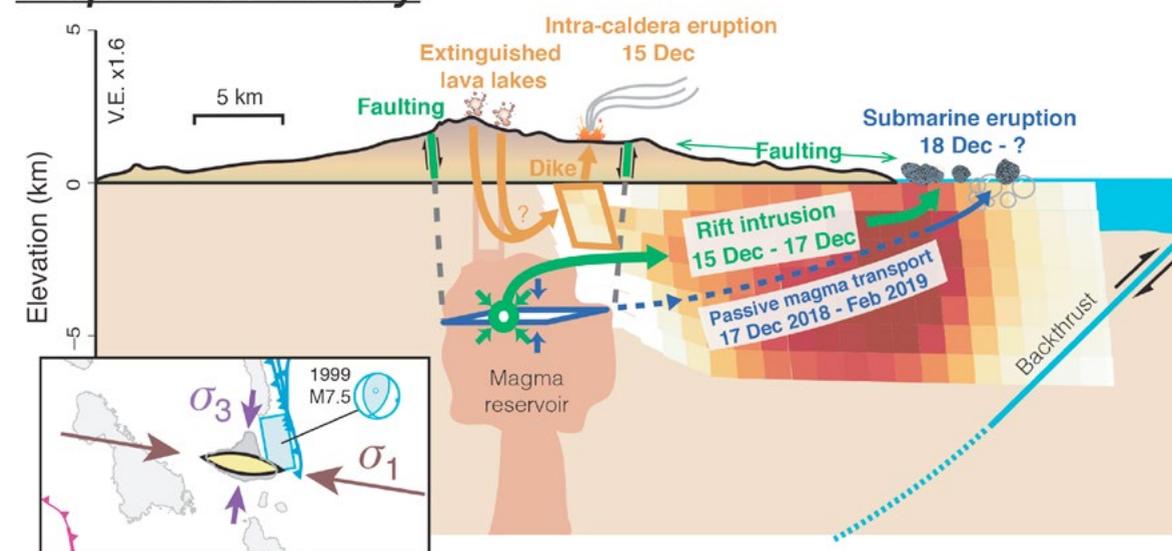
Data



Model



Eruption Summary



Modèle et chemin descriptif de la dynamique de la caldera et ensemble des observations multi-paramètres.
Model and descriptive path of the caldera dynamics and set of multi-parameter observations.
© IPGP - Shreve et al.

En décembre 2018, un important épisode volcanique s'est produit sur l'île Ambrym, au Vanuatu. Cette île volcanique basaltique, située dans la partie centrale de la zone de subduction des Nouvelles-Hébrides, abrite une caldera large de 12 km, ainsi que deux zones de rift bien connues.

In December 2018, a major volcanic episode occurred on Ambrym Island, Vanuatu. This basaltic volcanic island, located in the central part of the subduction zone of the New Hebrides, shows a 12 km wide caldera and two well-known rift zones.

Afin de comprendre les processus à l'œuvre lors de cet événement volcanique majeur, une équipe scientifique internationale a combiné une multitude de données haute résolution : mesures spatiales par imagerie satellitaire InSAR, complétées par des enregistrements GPS et des observations de terrain, données sismologiques, mesures d'anomalies thermiques et d'émissions de gaz. Ils révèlent ainsi qu'un volume important de magma basaltique (environ 0,4 km³) a migré du réservoir central vers la zone de rift sud-est au cours de ce seul épisode, drainant les divers lacs de lave et entraînant une subsidence de plus de 2 m au sein de la caldera. Avant cet événement, Ambrym était le plus grand émetteur passif de dioxyde de soufre volcanique au monde et le seul volcan connu à héberger simultanément cinq lacs de lave. Après l'éruption, toute cette activité de surface a cessé.

In order to understand the mechanism related to this major volcanic event, an international scientific team combined a multitude of high-resolution data: spatial measurements using InSAR satellite imagery, complemented by GPS records and field observations, seismological data, measurements of thermal anomalies and gas emissions. They thus reveal that a large volume of basaltic magma (about 0.4 km³) migrated from the central reservoir to the southeast rift zone during this single episode. The magma migration drained the various lava lakes and caused a subsidence of more than 2 m within the caldera. Prior to this event, Ambrym was the world's largest passive emitter of volcanic sulphur dioxide and the only known volcano to simultaneously host five lava lakes. After the eruption, all surface activity ceased.

Ce travail pluridisciplinaire permet de mettre en lumière la formation d'une caldera volcanique lorsque celle-ci se produit de manière progressive et silencieuse, réfutant l'hypothèse selon laquelle les dépressions de caldera se formeraient exclusivement lors d'effondrements majeurs accompagnés d'éruptions explosives. À Ambrym, un affaissement important de la caldera associé à la mise en place d'un dyke volumineux a coïncidé avec un arrêt complet du dégazage et des activités thermiques de surface.

This multidisciplinary work highlighted on the slow and silent formation of a volcanic caldera, against the commonly accepted hypothesis that caldera depressions are formed exclusively during major collapses accompanied by explosive eruptions. At Ambrym Island, the caldera collapse has been associated with large dyke formation and the consequent stop of degassing and surface thermal activities. This study highlights a new process of caldera formation and evolution; it also opens new perspectives for remote observation and monitoring of volcanoes from space, particularly interesting for remote sites.

Cette étude met en évidence un nouveau processus de formation et d'évolution d'une caldera et ouvre de nouvelles perspectives d'observation et de surveillance à distance des volcans depuis l'espace, notamment pour ce qui concerne les édifices difficiles d'accès.



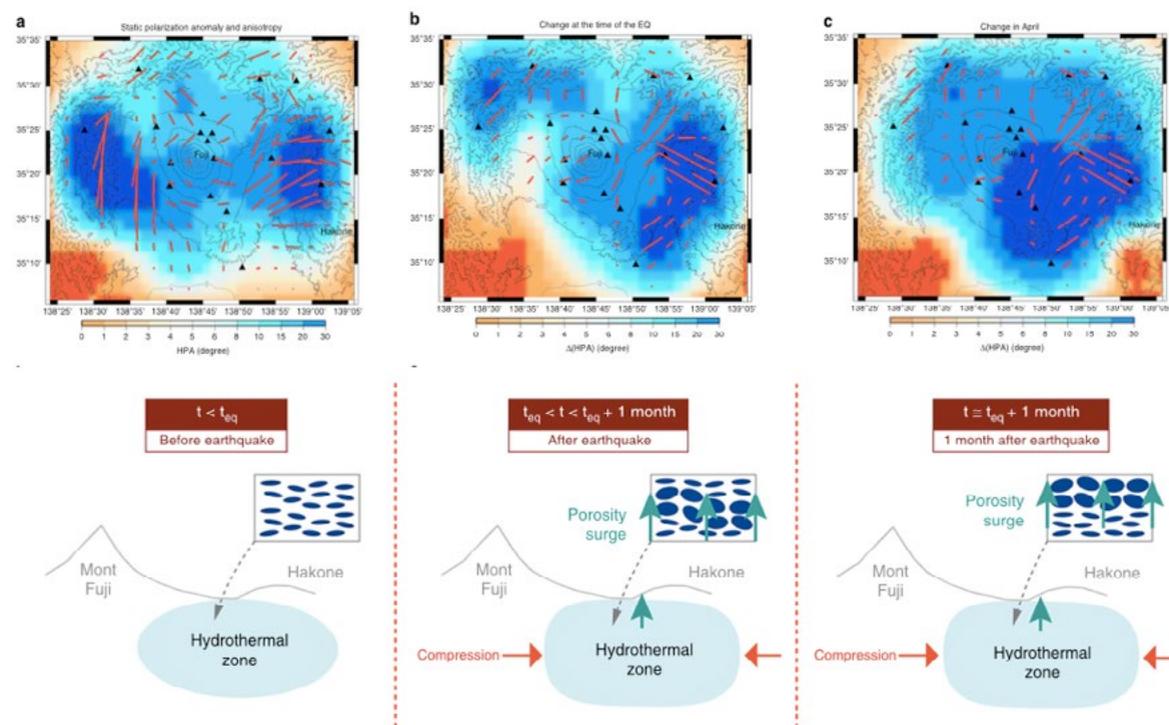
Ref : Shreve, T., Grandin, R., Boichu, M., Garaebiti, E., Moussallam, Y., Ballu, V., Delgado, F., Leclerc, F., Vallée, M., Henriot, N., Cevuard, S., Tari, D., Lebellegard, P. & Pelletier, B. From prodigious volcanic degassing to caldera subsidence and quiescence at Ambrym (Vanuatu): the influence of regional tectonics. *Scientific Reports*, (2019) 9:18868. DOI: 10.1038/s41598-019-55141-7.

Contact : shreve@ipgp.fr / grandin@ipgp.fr

#2

Imager les perturbations volcaniques liées aux grands séismes

Imaging volcanic disturbances related to large earthquakes



Variation de l'anisotropie dans la zone hydrothermale d'Hakone à la suite du séisme du Tohoku-Oki de 2011, par effet des fissures remplies de fluides hydrothermaux (ellipses bleues). Distribution statique moyennée sur l'année 2011 (A), lors du séisme (B) et un mois après (C). Les lignes rouges montrent l'orientation et amplitude de l'anisotropie moyennée (A) ou sa variabilité (B et C).

Variation in anisotropy in the Hakone hydrothermal zone following the Tohoku-Oki earthquake of 2011, due to the effect of cracks filled with hydrothermal fluids (blue ellipses). Static distribution averaged over the year 2011 (A), at the time of the earthquake (B) and one month after (C). The red lines show the orientation and amplitude of the mean anisotropy (A) or its variability (B and C).

© IPGP - Saade et al.

Dans un article publié dans Nature Communications en 2019, une équipe internationale, menée par des scientifiques de l'IPGP, a révélé les processus en jeu dans les régions volcaniques hydrothermales avant et après le méga-séisme du Tohoku au Japon ($M_w=9.0$, 11 mars 2011). Cette étude ouvre une nouvelle voie de surveillance des volcans, pour mieux comprendre et prévoir les aléas et risques associés.

L'approche des chercheurs se base sur la mesure des variations de l'anisotropie sismique dans cette région durant l'année 2011. L'anisotropie (amplitude et direction) est principalement due à l'alignement des fissures et des inclusions fluides, présentes au sein des roches traversées par l'onde sismique.

With a publication in Nature Communications in 2019, an international team, led by IPGP scientists, revealed the processes at play in hydrothermal volcanic regions before and after the Tohoku mega-quake in Japan ($M_w=9.0$, 11 March 2011). This study opens up a new avenue for monitoring volcanoes to better understand and predict associated hazards and risks.

The researchers' approach is based on measuring the variations in seismic anisotropy in this region during the year 2011. The anisotropy (amplitude and direction) is mainly due to the alignment of cracks and fluid inclusions present within the rocks traversed by the seismic wave.

Leurs résultats montrent que ce méga-séisme a profondément affecté les forces tectoniques de l'ensemble de l'archipel japonais, en particulier les zones volcaniques. Celle du Mont Fuji, à plus de 400 km de l'épicentre mais située à l'intersection de trois plaques tectoniques (Pacifique / Philippine / Okhotsk), semble avoir été particulièrement sensible à ce tremblement de terre.

Les variations temporelles de l'anisotropie sismique montrent bien qu'après le séisme, l'anisotropie change à l'est du mont Fuji, en s'orientant dans la direction du séisme. En revanche, les chercheurs observent une variation très rapide de cette dernière un mois après le séisme dans la zone volcanique hydrothermale de Hakone (à l'est du Mont Fuji), alors qu'une décroissance lente était attendue. Pour expliquer ce phénomène, ils émettent l'hypothèse que le séisme ait pu exciter le système hydrothermal et donner naissance à une onde de porosité des fluides hydrothermaux, qui s'est propagée depuis environ 3 km de profondeur jusqu'en surface à une vitesse de l'ordre de 1 mm s^{-1} .

Ces résultats montrent qu'une meilleure compréhension de l'origine de l'anisotropie et de ses changements temporels sous les volcans et dans la croûte peut fournir un éclairage nouveau sur les processus volcaniques actifs. Une mesure continue de l'anisotropie pourrait s'avérer très utile dans le cadre de la surveillance volcanique.



Ref : Saade, M., Araragi, K., Montagner, J.P. et al. Evidence of reactivation of a hydrothermal system from seismic anisotropy changes. *Nat Commun* 10, 5278 (2019). DOI: 10.1038/s41467-019-13156-8

Contact : montagner@ipgp.fr

#3

Comment les séismes glaciaires au Groenland permettent de suivre la perte de masse de la calotte polaire au fil du temps

How Greenland's glacial earthquakes track the loss of polar ice cap mass over time

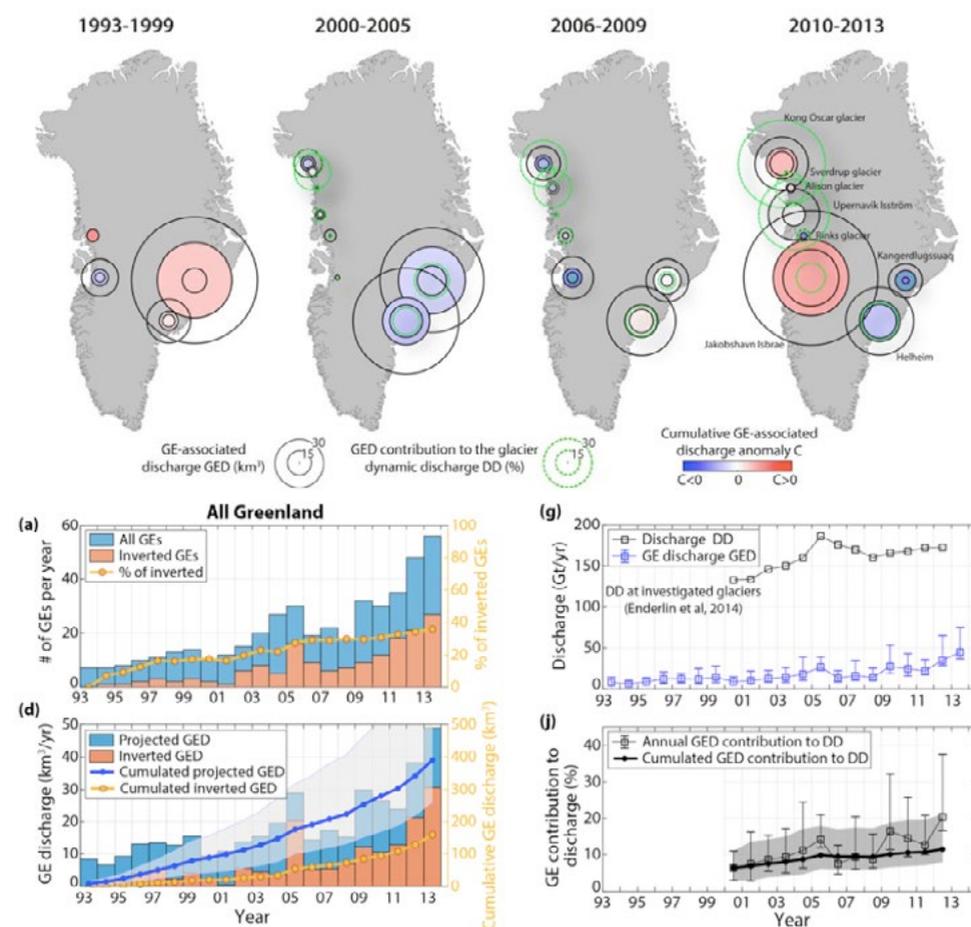
L'augmentation des températures des dernières décennies a favorisé l'accélération de la fonte des calottes polaires. En déchargeant cette glace dans l'océan sous forme d'eau de fonte ou d'icebergs, les glaciers côtiers de l'Arctique et de l'Antarctique contribuent ainsi à l'élévation du niveau des mers. Quantifier la répartition de la perte de masse des glaciers polaires est nécessaire pour comprendre la dynamique des glaciers dans le cadre du

Their results show that this mega-earthquake deeply affected the tectonic forces of the entire Japanese archipelago, particularly the volcanic areas. The one on Mount Fuji, more than 400 km from the epicenter but located at the intersection of three tectonic plates (Pacific/Philippine/Okhotsk), seems to have been particularly sensitive to the Tohoku event.

The temporal variations in seismic anisotropy show that after the earthquake, the anisotropy changes east of Mount Fuji, moving in the direction of the earthquake. On the other hand, researchers observe a very rapid variation of the latter one month after the earthquake in the hydrothermal volcanic zone of Hakone (East of Mount Fuji), whereas a slow decrease was expected. To explain this phenomenon, they hypothesize that the earthquake may have excited the hydrothermal system and generated a porosity surge in the hydrothermal fluids, which propagated from about 3 km depth to the surface at a velocity of about 1 mm s^{-1} .

These results show that a better understanding of the origin of anisotropy in the hydrothermal regions provides new insights to better understand active volcanic processes. Continuous measurement of anisotropy could be very useful for volcanic monitoring.

Rising temperatures in recent decades have helped accelerate the melting of the polar ice caps. By discharging this ice into the ocean in the form of melt water or icebergs, the coastal glaciers of the Arctic and Antarctic contribute to sea level rise. To understand glacier dynamics related to climate warming, it is primordial to estimate the mass loss of the polar glaciers. By combining seismological observations and mechanical analyses, an



Distribution des Glacial Earthquakes (GE) et de la décharge en eaux associée (GED) au Groenland entre 1993 et 2013, et son évolution au cours des années pour l'ensemble du Groenland.
Distribution of Glacial Earthquakes (GE) and associated water discharge (GED) in Greenland between 1993 and 2013, and its evolution over the years for the whole of Greenland.

© IPGP - Sergeant et al.

réchauffement climatique actuel. En combinant observations sismologiques et analyses mécaniques, une équipe internationale de l'IPGP, de l'INSIS (Centre des Matériaux et laboratoire PIMM), de l'ETH Zurich et de l'université de Swansea (Pays de Galles) a estimé la perte de glace de la calotte groenlandaise grâce à l'enregistrement et l'analyse de télé-séismes.

Depuis les années 2000, on observe au Groenland une accélération de la vitesse d'écoulement, de l'aminçissement et du retrait des glaciers côtiers, accompagnée de nombreux vêlages d'icebergs pouvant atteindre plusieurs milliards de mètres cubes. Dans certaines circonstances, il arrive que le glacier relâche dans la mer des icebergs gravitationnellement instables. Le déséquilibre entre gravité et poussée d'Archimède entraîne la lente bascule de ces icebergs sous l'influence des forces hydrodynamiques.

international team from IPGP, INSIS (Materials Centre and PIMM Laboratory), ETH Zurich and Swansea University (Wales) estimated the ice loss from the Greenland ice cap measuring earthquakes at tele-seismic distances.

Since the 2000s, Greenland has seen an acceleration in the rate of flow, thinning and retreat of coastal glaciers, accompanied by numerous icebergs calving of up to several billion cubic meters. Under certain circumstances, the glacier may release gravitationally unstable icebergs into the sea. Hydrodynamic forces - dominated by the gravity and Archimedes' thrust - cause the icebergs flip.

The action of the rotating iceberg against the front of the glacier generates - for several minutes - a horizontal contact force on the glacier. This force generates earthquakes of magnitude 5 and the consequent seismic waves

L'action de l'iceberg tournant contre le front du glacier génère pendant plusieurs minutes une force horizontale de contact sur le glacier, responsable d'ondes sismiques qui se propagent dans la Terre solide. Ces vêlages d'icebergs produisent des séismes de magnitude 5 détectables par les réseaux sismologiques globaux. L'inversion des signaux sismiques des stations du Groenland permet de retracer l'histoire de ces forces et de révéler la dynamique de bascule. En utilisant un modèle mécanique de vêlage d'icebergs permettant le calcul de cette force de contact, les chercheurs arrivent ainsi à contraindre le volume de glace associé à chaque séisme.

A l'heure actuelle, l'analyse d'images satellitaires permet de mesurer la migration des glaciers, cependant il est plus difficile d'identifier les différentes composantes de la perte de masse (fonte de la glace due à l'augmentation de la température ou production d'icebergs). Grâce aux sismogrammes, il est possible de quantifier indirectement le volume des icebergs. Entre 1993 et 2013, 400 à 500 séismes originaires d'une dizaine de glaciers du Groenland ont été détectés. Les résultats obtenus indiquent que de tels événements ont été responsables de la décharge d'au moins 370 Gt d'eau dans l'océan Arctique et Atlantique.

Les données obtenues des enregistrements sismiques révèlent que certains glaciers tels que Kangerdluqssuaq et Helheim au sud-est et le Jakobshavn Isbrae à l'ouest ont massivement contribué à cette perte de masse glaciaire (70 % du volume de glace perdue pendant 20 ans). Entre 8 et 21 % de la perte de masse mesurée est attribuée au vêlage des icebergs. Tandis que ce pourcentage semble se maintenir et même décroître pour les glaciers stabilisés à l'est, il explose à l'ouest du Groenland, alors même que ces glaciers ont amorcé un cycle de retrait dans les années 2000, qui continue encore aujourd'hui. Les chercheurs montrent ainsi que les glaciers occidentaux ont tendance à relâcher de plus gros icebergs depuis 2010, notamment en lien avec l'accélération des vitesses d'écoulement et des positions spécifiques des fronts glaciaires dans leur fjord.

propagation through the solid Earth, detectable by global seismological networks. The inversion of seismic signals from stations in Greenland allows us to trace the history of these forces and reveal the dynamics of the tilt. By using a mechanical iceberg calving model to calculate this contact force, researchers are able to constrain the volume of ice associated with each earthquake.

At present, the analysis of satellite images makes it possible to measure glacier migration, however it is more difficult to identify the different components of mass loss (melting of ice due to temperature increase or iceberg production). Thanks to seismograms, it is possible to indirectly quantify the volume of icebergs. Between 1993 and 2013, 400 to 500 earthquakes originating from about ten Greenland glaciers were detected. The results obtained indicate that such events have been responsible for the discharge of at least 370 Gt of water into the Arctic and Atlantic Oceans.

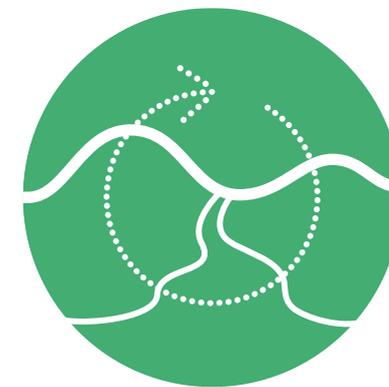
Data from seismic records show that some glaciers, such as Kangerdluqssuaq and Helheim in the southeast, and Jakobshavn Isbrae in the west, have contributed massively to this loss of ice mass (70% of the volume of ice lost over 20 years). Between 8 and 21% of the measured mass loss is attributed to iceberg calving. While this percentage seems to be maintained and even decreasing for the stabilized glaciers in the east, it explodes in western Greenland, even though these glaciers began a cycle of retreat in the 2000s that continues to this day. Researchers thus show that western glaciers have tended to release larger icebergs since 2010, particularly in connection with the acceleration of flow speeds and the specific positions of ice fronts in their fjords.



Ref : Sergeant A., Mangeny A., Yastrebov V., Walter F., Montagner J.-P., Stutzmann E., Castelnaud O., Bonnet P., Ralajasoroa J.-L., Bevan S. and Luckman A. Monitoring Greenland ice sheet buoyancy-driven calving discharge using glacial earthquakes. *Annals of Glaciology*, 60(79), 75-95, 2019.

DOI: 10.1017/aog.2019.7

Contact : mangeny@ipgp.fr



Système Terre

Earth system science

Le thème **Système Terre** s'intéresse aux interactions entre les enveloppes externes de notre planète (lithosphère, hydrosphère, biosphère et atmosphère). Des surfaces continentales au fond des océans, les organismes vivants, l'air, l'eau et la roche interagissent de façon complexe. Théâtre de transformations chimiques, de réactions biologiques et d'échanges de flux d'énergie et de matière, ces milieux jouent un rôle environnemental majeur à la surface de la Terre. Ils incluent notamment la zone critique, couche la plus externe de notre planète qui s'étend 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.

The Earth System Science theme focuses on the interaction between the outer layers of our planet (lithosphere, hydrosphere, biosphere and atmosphere). From land surfaces to the ocean floor, living organisms, air, water and rock interact in complex ways. Resulting from chemical transformations, biological reactions, and fluxes of energy and matter, these environments play a major role in the evolution of the Earth's surface. They include the critical zone, the outermost layer of our planet, extending from the bottom of the groundwater to the top of the atmospheric boundary layer. Because it concentrates most human activities, the critical zone is subject to rapid and profound changes affecting living organisms and their surroundings.

#1

Comment les tempêtes régissent l'érosion sur les îles volcaniques : l'exemple de la Réunion

How storms control erosion on volcanic islands: the example of Reunion Island

L'érosion au sens large (physique et chimique) est intimement liée à la présence d'eau sur Terre, et donc aux précipitations. En effet, la pluie contrôle le débit des rivières, qui entraîne à son tour l'incision des roches et le transport des sédiments. Elle facilite également l'altération chimique et l'érosion des sols, pouvant causer des glissements de terrain. Même s'il est communément admis que l'érosion est directement liée au régime moyen des précipitations, leur variabilité est considérée comme un facteur aggravant pour lequel les travaux quantitatifs sont rares.

Dans cette étude, l'île de la Réunion est utilisée comme un laboratoire naturel pour tester les relations entre le taux de précipitation moyen, la variabilité des précipitations et le taux d'érosion à long terme. La Réunion est une île volcanique formée de deux volcans, le Piton des Neiges et le Piton de la Fournaise ; elle est soumise à un régime climatique tropical à forte activité cyclonique et son relief escarpé témoigne d'une érosion intense. En comparant la topographie actuelle de l'île avec un modèle d'il y a 60-70 mille ans reconstruit à partir d'observations de terrain et de datations de lave préexistantes, les taux d'érosion à long terme des sept bassins principaux de l'île ont pu être calculés. Ceux-ci varient selon les bassins de 0.8 à 10 mm par an, des valeurs exceptionnellement hautes et comparables aux taux les plus forts observés dans les chaînes de montagne actives comme l'Himalaya ou à Taiwan.

L'examen de la répartition spatiale de ces taux d'érosion et des taux de précipitation sur l'ensemble de l'île montre que l'érosion à long terme de la Réunion n'est pas, comme attendu, positivement corrélée avec le taux de précipitation moyen, calculé sur la période 1981-2010. Au contraire, la zone « au vent » (nord-est de l'île soumis aux alizés) qui connaît les cumuls de précipitations les plus forts (jusqu'à 11 m par an), affiche les taux d'érosion les plus faibles, alors que la zone « sous le vent » (sud-ouest de l'île), plus aride, est caractérisée par des taux d'érosion beaucoup plus forts. De plus, il apparaît que ces taux d'érosion sont indépendants de l'intensité des précipitations extrêmes cycloniques.

Erosion in the broad sense (physical and chemical) is intimately linked to the presence of water on Earth, and therefore to precipitation. Indeed, rain controls river flow, and thus bedrock incision and sediment transport. It also acts as a control on chemical weathering and soil erosion, which can cause landslides. Although it is commonly accepted that erosion must be directly linked to the mean precipitation rates, the impact of rainfall variability on erosion remains unclear.

In this study, Reunion Island is used as a natural laboratory to test the relationships between mean precipitation rates, rainfall variability, and long-term erosion rates. Reunion is a volcanic island formed of two volcanoes, the Piton des Neiges and the Piton de la Fournaise; it is dominated by a tropical climate with strong cyclonic activity and its steep relief suggests intense erosion. By comparing the current topography of the island with a model from 60-70 ky ago reconstructed from field observations and pre-existing dating of lava flows, the long-term erosion rates of the seven major watersheds of the island could be calculated. These rates range from 0.8 to 10 mm per year. These values are exceptionally high and comparable to the highest rates observed in active mountain ranges such as the Himalayas or in Taiwan.

Examination of the spatial distribution of these erosion rates and rainfall rates over the whole island shows that long-term erosion in Reunion is not, as expected, positively correlated with the mean precipitation rate calculated over the period 1981-2010. On the contrary, the "windward" zone (north-east of the island subject to the trade winds), which has the highest cumulative rainfall (up to 11 m per year), displays the lowest erosion rates, whereas the arid "leeward" zone (south-west of the island) is characterized by much higher erosion rates. Furthermore, it appears that these erosion rates are independent of the intensity of extreme cyclonic precipitation.

However, the rainfall variability, which differs greatly between the two coasts of Reunion, is positively correlated with erosion rates on the island. Indeed, the spatial

En revanche, la variabilité annuelle des précipitations, qui diffère grandement entre les deux côtes de la Réunion, est positivement corrélée aux taux d'érosion sur l'île. En effet, la distribution spatiale des précipitations moyennes vs. extrêmes entraîne une dissymétrie de la variabilité temporelle des précipitations entre les deux côtes. En hiver, la couche d'inversion thermique, qui se situe aux alentours de 2500 m d'altitude, empêche l'air humide de se concentrer sur les sommets, provoquant la majorité des précipitations sur le côté au vent de l'île. A contrario, en été, la couche d'inversion thermique s'élève au-dessus du sommet du Piton des Neiges (> 3000 m) induisant des précipitations cycloniques de part et d'autre des sommets de l'île.

distribution of mean vs. extreme precipitation leads to an asymmetry in the temporal variability of precipitation between the two coasts. In winter, the thermal inversion layer, which is around 2500 m above sea level, prevents humid air from accumulating on the summits, causing most of the precipitation on the windward side of the island. Conversely, in summer, the thermal inversion layer rises above the Piton des Neiges (> 3000 m) distributing cyclonic precipitation on both sides of the island's summits.

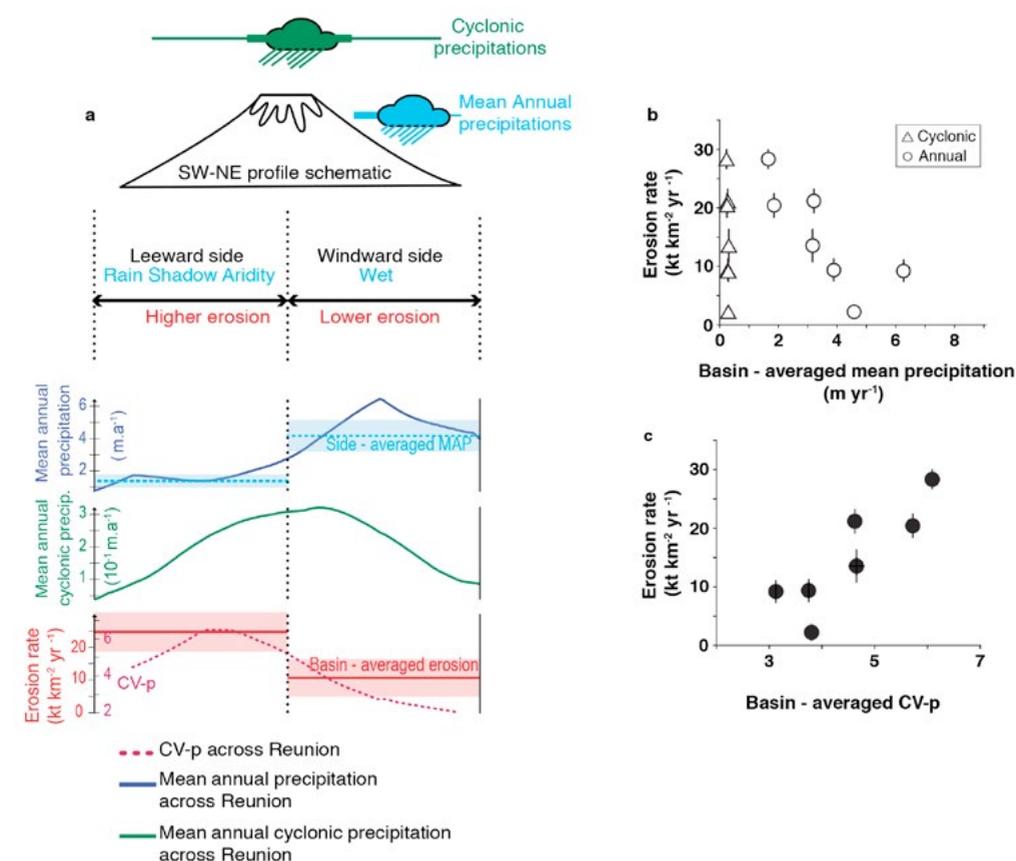


Schéma des relations entre érosion, précipitations moyennes et précipitations extrêmes à la Réunion. (a) Les mouvements saisonniers de la couche d'inversion thermique entraînent la concentration de la majorité des précipitations annuelles (*Mean annual precipitation*) sur la côte au vent et mènent à une répartition symétrique des précipitations cycloniques (*Mean annual cyclonic precipitation*) entre les deux côtes de l'île. Le rapport d'intensité de ces deux types de précipitations est caractérisé par le coefficient de variation de précipitations journalières (CV-p). (b) Relation négative entre les précipitations moyennes et le taux d'érosion à long-terme, et absence de corrélation entre les précipitations cycloniques et le taux d'érosion. (c) Relation positive entre le taux d'érosion et la variabilité des précipitations (CV-p). L'érosion est d'autant plus forte que la différence d'intensité entre les précipitations annuelles et extrêmes est importante (= CV-p fort).

Diagram of the relationships between erosion, mean precipitation and extreme precipitation in Reunion Island. (a) The seasonal movements of the thermal inversion layer result in the concentration of the majority of annual precipitation (*Mean annual precipitation*) on the windward coast and lead to a symmetrical distribution of cyclonic precipitation (*Mean annual cyclonic precipitation*) between the two sides of the island. The intensity ratio of these two types of precipitation is characterized by the coefficient of variation of daily precipitation (CV-p). (b) Negative relationship between mean precipitation and long-term erosion rates, and lack of correlation between cyclonic precipitation and erosion rates. (c) Positive relationship between erosion rates and precipitation variability (CV-p). The greater the difference in intensity between annual and extreme precipitation, the greater the erosion (= high CV-p).

© IPGP - Gayet et al.

Cette relation positive entre variabilité des précipitations et érosion montre que les zones les moins arrosées sont les plus vulnérables à l'érosion causée par les précipitations extrêmes. Contrairement à l'hypothèse utilisée par les modèles d'incision des rivières sur le rôle prépondérant de l'intensité moyenne des précipitations, cette étude suggère que la variabilité temporelle des précipitations contrôle l'érosion via son influence sur différentes variables de la zone critique. En effet, les régimes moyens des précipitations influencent les types et la densité de la végétation, les densités racinaires ou encore la résistance des sols. Ces variables peuvent à leur tour entraîner des réponses différentes du système aux précipitations extrêmes.

This positive relationship between rainfall variability and erosion shows that low rainfall areas are the most vulnerable to erosion caused by extreme precipitation. Contrary to the assumption used by river incision models on the predominant role of the mean precipitation intensity, this study suggests that the temporal variability of precipitation controls erosion through its influence on various variables of the critical zone. Indeed, the mean precipitation regimes influence the type and density of vegetation, the root density and even the soil resistance. These variables, in turn, can lead to different system responses to extreme precipitation events.



Ref : Gayer E., Michon L., Louvat P., and Gaillardet J., *Storm-induced precipitation variability control of long-term erosion*; *Earth and Planetary Science Letters* 517:61-70, 2019. DOI: 10.1016/j.epsl.2019.04.003
Contact : egayer@ipgp.fr

#2

Cartographier la rugosité de surface depuis l'espace Mapping surface roughness from space

Les surfaces terrestres et planétaires ne sont ni lisses, ni régulières. La rugosité des sols est un paramètre clé qui contrôle de nombreuses propriétés et processus physiques à leur surface : humidité, température, échanges gazeux, transport et dépôt de sédiments, érosion, infiltration et ruissellement de l'eau, traficabilité. Sa mesure sur le terrain est complexe, d'autant plus qu'il s'agit d'une grandeur physique multi-échelle. La télédétection dans les domaines solaire, infrarouge thermique et micro-onde est susceptible de nous renseigner sur ce paramètre à différentes échelles, grâce au rayonnement électromagnétique diffusé ou émis par les surfaces en direction d'un capteur embarqué sur un drone, un avion ou un satellite. Dans le domaine solaire (incluant le spectre visible), toutes les échelles spatiales contribuent à moduler l'intensité de la lumière diffusée vers l'observateur : échelle microscopique et échelle mésoscopique de 10 µm à 1 cm (particules de sol, régolite), échelle macroscopique de 1 cm à 1 m (mottes de terre, agrégats de roche ou de glace, micro-fractures, coulées de lave), échelle topographique de 1 m à plusieurs kilomètres (failles, collines, cratères, montagnes). Pourtant, la contribution relative de chacune de ces échelles de rugosité est très mal connue.

The terrestrial and planetary surfaces are neither smooth nor regular. Soil roughness is a key parameter that controls many properties and physical processes on their surface: humidity, temperature, gas exchange, sediment transport and deposition, erosion, water infiltration and runoff, trafficability. Its measurement in the field is complex, especially since it is a multi-scale physical quantity. Remote sensing in the solar, thermal infrared and microwave domains is likely to inform us about this parameter at different scales thanks to the electromagnetic radiation scattered or emitted by surfaces towards a sensor onboard a drone, an airplane or a satellite. In the solar domain (including the visible spectrum), all spatial scales contribute to modulating the intensity of light scattered towards the observer: microscopic and mesoscopic scales from 10 µm to 1 cm (soil particles, regolith), macroscopic scale from 1 cm to 1 m (clods, rock or ice aggregates, micro-fractures, lava flows), and topographic scale from 1 m to several kilometers (faults, hills, craters, mountains). However, the relative contribution of each of these roughness scales is poorly known.



Spectro-goniomètre Chamelon de l'ONERA dans le rift d'Asal-Ghoubbet (République de Djibouti).
ONERA's Chamelon spectro-goniometer in the Asal-Ghoubbet Rift (Republic of Djibouti).
© IPGP

L'objectif de cette étude est de mieux comprendre lesquelles influencent le plus la fonction de diffusion du rayonnement incident (ou BRDF pour Bidirectional Reflectance Distribution Function). Sébastien Labarre et ses collègues se sont ainsi rendus dans le rift d'Asal-Ghoubbet (République de Djibouti), qui présente une grande variété de terrains volcaniques et sédimentaires en termes de couleur et de rugosité de surface. L'inversion bayésienne du modèle photométrique de Hapke a été effectuée sur des BRDF mesurées d'une part depuis l'espace par le satellite Pléiades et d'autre part sur le terrain grâce au spectro-goniomètre Chamelon de l'ONERA. L'équipe de chercheurs a montré qu'il était possible de déterminer grâce à ce modèle une rugosité moyenne compatible avec la réalité du terrain. Cette étude ouvre des perspectives intéressantes en micrométéorologie, en agriculture, en hydrologie, en géomorphologie, en planétologie et dans le domaine de la défense.

The aim of this study is to understand better which ones most influence the scattering function of incident radiation (or BRDF for Bidirectional Reflectance Distribution Function). Sébastien Labarre and his colleagues went to the Asal-Ghoubbet rift (Republic of Djibouti) which presents a wide variety of volcanic and sedimentary terrains in terms of colour and surface roughness. A Bayesian inversion of the Hapke photometric model was carried out on BRDFs measured both from space, using the Pleiades satellite, and in the field, using ONERA's Chamelon spectro-goniometer. The team of researchers showed that it was possible to determine with this model an average roughness compatible with the reality on the ground. This study opens up interesting perspectives in micrometeorology, agriculture, hydrology, geomorphology, planetology, and in the field of defence.



Ref : Labarre S., Jacquemoud S., Ferrari C., Delorme A., Derrien A., Grandin R., Jalludin M., Lemaître F., Métois M., Pierrot-Deseilligny M., Rupnik E., Tanguy V., *Retrieving soil surface roughness with the Hapke photometric model: Confrontation with the ground truth*, *Remote Sensing of Environment*, 225:1-15, 2019. DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.014
Contact : jacquemoud@ipgp.fr / ferrari@ipgp.fr

#3

Nanoparticules marquées isotopiquement : vers une meilleure compréhension des mécanismes de contamination des milieux aquatiques

Isotopically labeled nanoparticles: toward a better understanding of contamination mechanisms of aquatic systems

Les nanoparticules manufacturées (MNPs) entrent dans la composition de nombreux produits de consommation courante, du fait de leurs propriétés chimiques, optiques, magnétiques ou mécaniques exceptionnelles (comme agent de blanchiment dans les peintures ou dans les produits alimentaires, comme antibactériens, pour absorber les UV dans les crèmes solaires, pour améliorer la couleur et la luminosité de dispositifs d'affichage lumineux (LED) ou dans les panneaux solaires, etc.). Et l'utilisation et l'élimination de ces produits conduit à la libération de ces nanomatériaux dans les eaux usées ou dans l'environnement. Or, les nanoparticules manufacturées ont potentiellement un impact important sur cet environnement. Mieux comprendre la façon donc elles se dispersent dans les milieux aquatiques est donc primordial.

Manufactured nanoparticles (MNPs) are used in mass consumption goods, due to their exceptional chemical, optical, magnetic or mechanical properties (as whitening in paints or food products, as antibacterials, as UV absorbers in sunscreens, to improve the color and brightness of light display devices or in solar panels, etc.). The use and disposal of these products leads their release into wastewater or terrestrial and aquatic environments. However, manufactured nanoparticles have a potentially significant impact on those environments and better understanding of their dispersion in aquatic environments is therefore essential.

Les méthodes d'analyse traditionnelles ne permettent pas de détecter et d'analyser les MNPs aux très faibles concentrations, proches de celles rencontrées dans les milieux naturels. Or, la concentration des MNPs dans le milieu est un paramètre influençant fortement leur devenir (dissolution ou agrégation par exemple) dans l'environnement.

Traditional analytical methods do not detect and analyze MNPs at very low concentrations, similar to those found in natural systems. Indeed, the concentration of MNPs in these systems is a parameter that strongly influences their fate (e.g. dissolution or aggregation) in the environment.

Une équipe de scientifiques de l'IPGP, d'Université de Paris et de l'IMPMC, propose une nouvelle méthode, alliant d'une part l'utilisation d'isotopes stables non traditionnels (^{111}Cd , ^{77}Se , ^{68}Zn) comme traceurs incorporés dans des nanoparticules (dites « spikées ») de type boîtes quantiques et d'autre part, l'analyse par spectromètre de masse à source plasma à haute résolution. Ces analyses ont ainsi permis de détecter des éléments constitutifs des nanoparticules aux niveaux de concentrations comparables à ceux mesurés en milieux naturels.

A team of scientists from IPGP, Université de Paris and IMPMC, proposes a new method, combining the use of non-traditional stable isotopes (^{111}Cd , ^{77}Se , ^{68}Zn) as tracers embedded in Quantum Dot-type nanoparticles (so-called "spiked" nanoparticles) and high-resolution inductively-coupled plasma mass-spectrometer analysis. These analyses allowed to detect the constitutive elements of nanoparticles at concentrations similar to those expected in aquatic environments.

Ce modèle expérimental ouvre donc une voie nouvelle pour une meilleure modélisation du devenir des nanoparticules disséminées dans les milieux aquatiques.

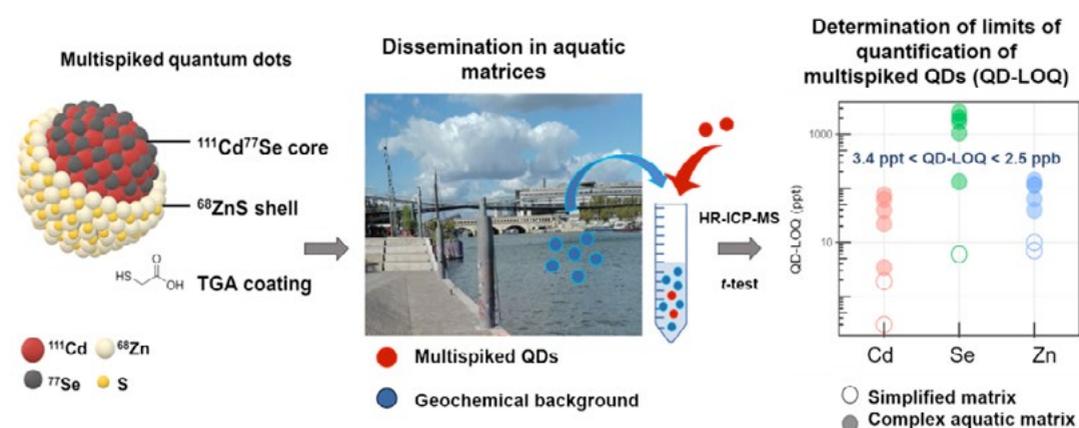
Therefore, this experimental model opens new perspectives for an improved modeling of the fate of nanoparticles dispersed in aquatic ecosystems.



Ref : Supiandi, I., Charron, G., Tharaud, M., Cordier, L., Guigner, J.-M., Benedetti, M. F. & Sivry, Y. *Isotopically Labeled Nanoparticles at Relevant Concentrations: How Low Can We Go? The Case of CdSe/ZnS QDs in Surface Waters. Environmental Science & Technology* 2019 53 (5), 2586-2594.

DOI: 10.1021/acs.est.8b04096

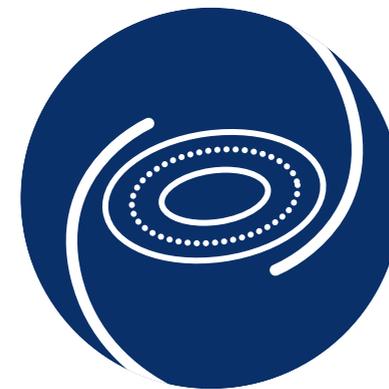
Contact : sivry@ipgp.fr



Des nanoparticules manufacturées (appelées ici « Quantum Dots, QDs ») d'une taille de 7nm ont été marquées avec des isotopes peu présents à l'état naturel (^{111}Cd , ^{77}Se , ^{68}Zn), puis plongées au laboratoire dans des solutions représentatives de milieux aquatiques (eaux de rivières, d'estuaire et de mer) à de très faibles concentrations. Les analyses de ces suspensions par spectrométrie de masse à source plasma (HR-ICP-MS) ont démontré que la détection des nanoparticules isotopiquement marquées est possible à des niveaux bien plus bas que ceux déterminés par les méthodes « classiques », basées sur la mesure des isotopes naturellement plus abondants.

Manufactured nanoparticles ("Quantum Dots", or "QDs") of a 7-nm size were marked with isotopes poorly abundant in natural materials (^{111}Cd , ^{77}Se , ^{68}Zn), and then immersed at the laboratory in solutions characteristic of those encountered in aquatic environments (such as riverine, estuarine waters or seawater) at very low concentrations. Analyses of these solutions by plasma-source mass spectrometry (HR-ICP-MS) showed that measuring the low-level concentration of these isotopically-marked nanoparticles was made much easier compared to more "conventional" techniques based on naturally abundant isotopes.

© Supiandi et al.



Origines Origins

Les planètes du Système solaire présentent des compositions et structures particulièrement variées dont les processus originels demeurent largement débattus. L'étude de ces derniers s'avère primordiale pour comprendre comment ils ont pu contrôler à la fois la dynamique de formation, la composition et l'évolution de la Terre et des autres planètes, la chimie prébiotique ou encore les conditions environnementales relatives au développement des premiers organismes vivants sur Terre, voire ailleurs dans le Système solaire et même au-delà, sur des 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 décodage de ces processus fondamentaux.

The planets of the Solar System present particularly varied compositions and structures whose original processes remain widely debated. The study of the latter is essential to understand how they were able to control the formation dynamics, composition and evolution of the Earth and other planets, prebiotic chemistry, and environmental conditions relating to the development of the first living organisms on Earth, and even elsewhere in the Solar System and beyond, on 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 processes.

Origine des premiers minéraux du Système solaire Origin of the first minerals in the Solar System

L'origine des minéraux des premiers deux-cent-mille ans du Système solaire reste un mystère. En effet, les météorites primitives (appelées chondrites) présentent une diversité minéralogique difficile à réconcilier avec l'hypothèse classique d'une nébuleuse solaire gazeuse, initialement chaude, qui refroidirait de manière lente et statique. Dans ce paradigme encore souvent utilisé, les minéraux se forment à une température d'autant plus basse qu'ils sont loin du Soleil, impliquant de fait qu'ils soient tous identiques à une distance donnée du Soleil. Or les chondrites représentent un mélange de minéraux formés à basse (800 K) et haute température (1700 K).

Afin de résoudre ce mystère, Francesco Pignatale, post-doctorant à l'IPGP, et ses collègues ont simulé numériquement l'effondrement d'un nuage pré-stellaire sur une nébuleuse solaire. Ils mettent ainsi en évidence que le refroidissement du disque et l'effondrement de la nébuleuse (qui injecte des minéraux froids) se déroulent simultanément, mélangeant localement les différents types de minéraux. En outre, le disque protoplanétaire s'étale vigoureusement sous l'effet de la viscosité, transportant des minéraux chauds, formés près de l'étoile, vers les régions externes. Ces phénomènes expliquent dès lors l'abondance de minéraux formés à hautes températures dans les populations de chondrites carbonées, dont les corps parents orbitent loin du Soleil.

The origin of the minerals of the first two hundred thousand years of the Solar System remains a mystery. Indeed, primitive meteorites (called chondrites) present a mineralogical diversity that is difficult to reconcile with the classical hypothesis of an initially hot gaseous solar nebula, which cooled slowly and statically. In this paradigm, which is still often used, minerals form at a lower temperature the further away from the Sun they are, implying that they are all identical at a given distance from the Sun. Chondrites represent a mixture of minerals formed at low (800 K) and high (1700 K) temperatures.

To solve this mystery, Francesco Pignatale, a post-doctoral fellow at IPGP, and his colleagues have digitally simulated the collapse of a pre-stellar cloud on a solar nebula. They thus show that the cooling of the disk and the collapse of the nebula (which injects cold minerals) take place simultaneously, locally mixing the different types of minerals. In addition, the protoplanetary disk spreads strongly under the effect of viscosity, transporting hot minerals, formed near the star, to the outer regions. These phenomena therefore explain the abundance of minerals formed at high temperatures in carbonaceous chondrite populations, whose parent bodies orbit far from the Sun.



Ref :

1) Pignatale, F., Charnoz, S., Chaussidon, M. & Jacquet, E. *Making the Planetary Material Diversity During the Early Assembling of the Solar System*. 2018, *The Astrophysical Journal Letters*, 867, L23.

DOI : 10.3847/2041-8213/aab22

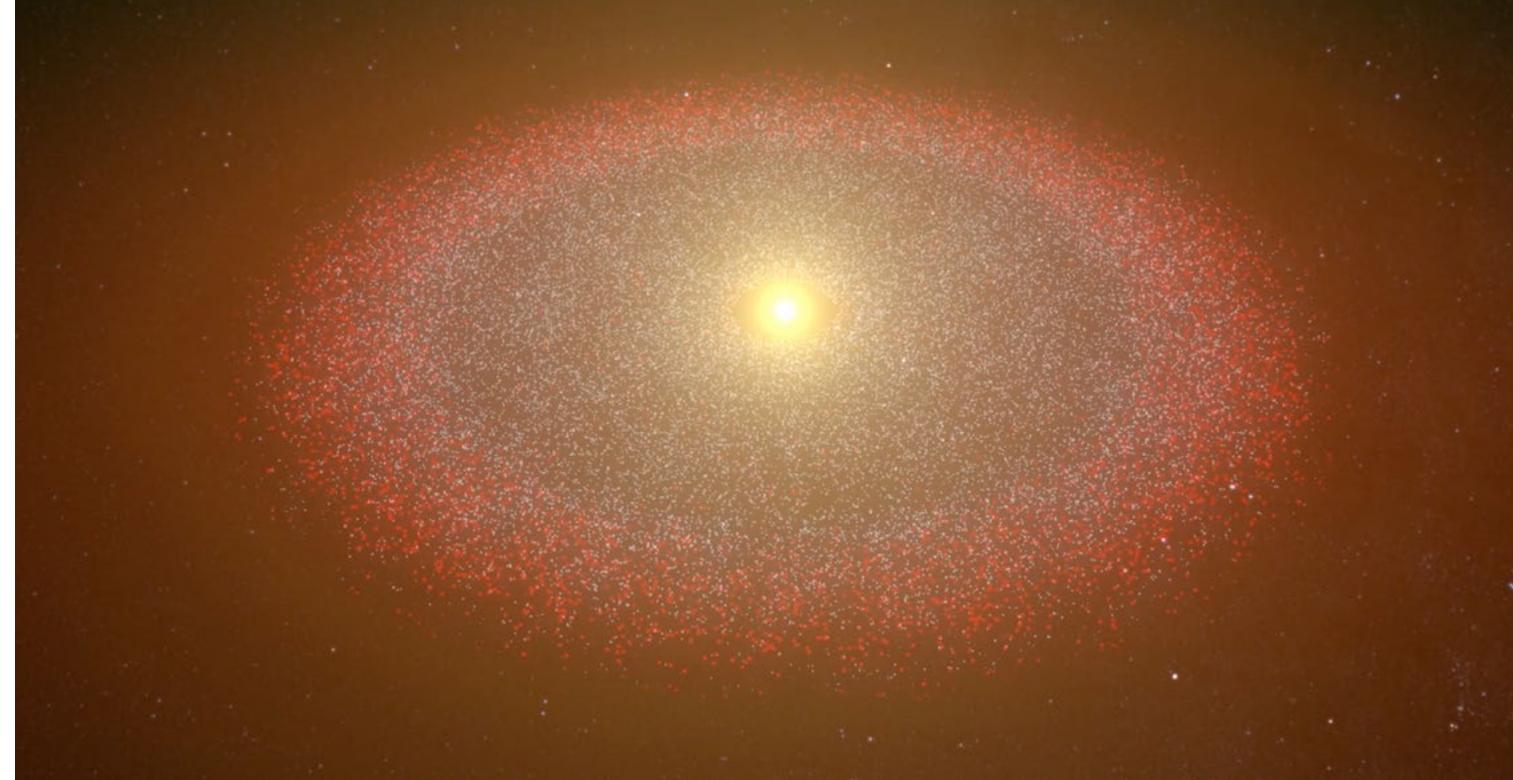
2) Pignatale, F., Jacquet, E., Chaussidon, M. & Charnoz, S. *Fingerprints of the Protosolar Cloud Collapse in the Solar System I: Distribution of presolar short-lived ²⁶Al*. 2019, *The Astrophysical Journal*, 844 (1), 31.

DOI : 10.3847/1538-4357/ab3c1f

3) Jacquet, E., Pignatale, F., Chaussidon, M. & Charnoz, S. *Fingerprints of the protosolar cloud collapse in the Solar System II: Nucleosynthetic anomalies in meteorites*. 2019, *The Astrophysical Journal*, 844 (1), 32.

DOI : 10.3847/1538-4357/ab38c1

Contact : charnoz@ipgp.fr



Extrait de la vidéo « À la naissance du Système solaire »
Extract from the video "At the birth of the Solar System"
© IPGP

Nouvelles perspectives sur la synthèse organique abiotique associée à l'altération hydrothermale de la lithosphère océanique New perspectives on abiotic organic synthesis and processing during hydrothermal alteration of the oceanic lithosphere

La synthèse organique abiotique permettant de passer d'un monde minéral à des composés organiques formant le vivant est un processus naturel se produisant notamment lors de l'altération hydrothermale des roches du manteau terrestre. Pendant de nombreuses années, ces roches ont intrigué par leur capacité à produire de grandes quantités de méthane. Très récemment, cette synthèse de méthane à des températures inférieures à 300-400°C a été fortement remise en cause pour des questions d'inhibition cinétique. La forme prédominante de composés organiques abiotiques qui se formerait à la place serait de la matière carbonacée. Sa synthèse serait associée aux réactions d'altération des minéraux formant les roches mantelliques, telles qu'illustrées par les travaux de Sforza et al. publiés fin 2018 et menés dans le cadre du projet deepOASES financé par l'ANR et porté par l'IPGP.

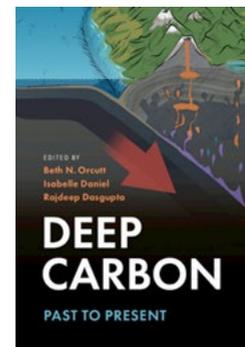
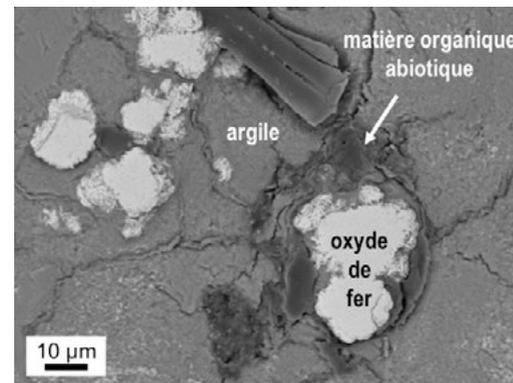
Abiotic organic synthesis, which allows us to move from a mineral world to organic compounds that form living organisms, is a natural process that occurs in particular during the hydrothermal weathering of the rocks of the earth's mantle. For many years, these rocks intrigued by their ability to produce large amounts of methane. Very recently, this synthesis of methane at temperatures below 300-400°C has been strongly challenged because of kinetic inhibition issues. The predominant form of abiotic organic compounds that would form instead would be carbonaceous material. Its synthesis would be associated with the weathering reactions of the minerals forming the mantle rocks, as illustrated by the work of Sforza et al. published at the end of 2018 and conducted as part of the deepOASES project funded by ANR and carried out at IPGP.

Ce type de carbone organique - non comptabilisé jusqu'à présent dans les bilans globaux et potentiellement très réactif - semble être omniprésent dans la lithosphère océanique, ce qui pourrait avoir de profondes implications pour le cycle profond du carbone, le développement des écosystèmes microbiens profonds et l'origine de la vie sur Terre.

Ces découvertes sont compilées dans un chapitre (Andreani et Ménez) du nouvel ouvrage « Deep Carbon : Past to Present », sorti fin 2019 qui compile 10 années de recherche du Deep Carbon Observatory (<https://deepcarbon.net/>), une initiative internationale de recherche sur le carbone profond à laquelle plusieurs équipes de l'IPGP ont activement participé.

This type of organic carbon - so far not accounted for in global budgets and potentially highly reactive - appears to be ubiquitous in the ocean lithosphere, which could have profound implications for the deep carbon cycle, the development of deep microbial ecosystems and the origin of life on Earth.

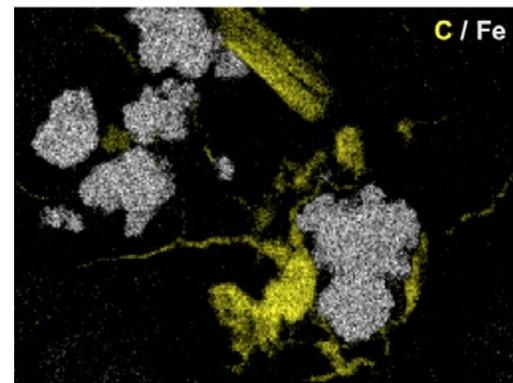
These discoveries are compiled in a chapter (Andreani and Ménez) of the new book "Deep Carbon: Past to Present", released in late 2019, which compiles 10 years of research by the Deep Carbon Observatory (<https://deepcarbon.net/>), an international deep carbon research initiative in which several IPGP teams have actively participated.



Matière carbonacée observée par microscopie électronique à balayage et imagerie élémentaire dans des roches de la lithosphère océanique. Cette matière organique se serait formée sans l'intervention du vivant c'est-à-dire de manière abiotique lors de l'altération de la roche en argile et oxydes de fer. Ces découvertes font l'objet d'un chapitre dans l'ouvrage « Deep Carbon: Past to Present » sorti fin 2019.

Carbonaceous material observed by scanning electron microscopy and elemental imaging in rocks of the ocean lithosphere. This organic matter would have formed without the intervention of living organisms, i. e. abiotically during the weathering of the rock into clay and iron oxides. These discoveries are the subject of a chapter in the book "Deep Carbon: Past to Present" published at the end of 2019.

© IPGP



Ref :

1) Andreani, M. & Ménez, B. (2019) *New perspectives on abiotic organic synthesis and processing during hydrothermal alteration of the oceanic lithosphere*. In: *Deep Carbon: Past to Present – chap 15* (eds B. Orcutt, I. Daniel, R. Dasgupta), Cambridge University Press, pp 447-479. DOI: 10.1017/9781108677950.

2) Sforna, M. C., Brunelli, D., Pisapia, C., Pasini, V., Malferrari, D. & Ménez, B. (2018) *Abiotic formation of condensed carbonaceous matter in the hydrating oceanic crust*. *Nature Communications* 9, 5049. DOI: 10.1038/s41467-018-07385-6

Contact : menez@ipgp.fr

#3

La tectonique des plaques, une histoire très ancienne Plate tectonics, a very old story

L'origine temporelle de la tectonique des plaques reste très débattue. La Terre a-t-elle connu une jeunesse sans tectonique des plaques ? Et si oui, quand celle-ci s'est-elle mise en place ? Ces questions scientifiques majeures sont encore à résoudre. Des fragments des continents les plus anciens préservés jusqu'à aujourd'hui, comme les roches granitoïdes formées à l'archéen, sont des témoins cruciaux des mécanismes à l'œuvre dans les premiers milliards d'années de notre planète. L'absence de traceurs chimiques ou isotopiques empêchait pour l'instant de trancher entre deux hypothèses envisagées pour expliquer l'origine de ces roches primitives : la fusion d'une croûte océanique hydratée plongeante dans le manteau terrestre (cette subduction impliquant donc une activité tectonique) ou la fusion en profondeur à la base d'un plateau océanique (sans activité tectonique).

Une étude menée par Zhengbin Deng, doctorant à l'IPGP, a montré que la composition des granitoïdes archéens et en particulier leurs rapports isotopiques du silicium, sont typiques de la chimie des océans primitifs ; plus particulièrement des sédiments marins siliceux spécifiques des océans archéens (les cherts). La présence de cette signature isotopique typique dans des magmas mis en place dans la croûte terrestre ne peut être expliquée que par la fusion de la croûte océanique hydratée plongeante dans le manteau lors d'un processus de subduction. Cette observation permet ainsi de lever les doutes quant à l'origine de ces roches et montre que la Terre présentait déjà une activité de type tectonique des plaques il y a 4 milliards d'années.

The temporal origin of plate tectonics is still very much debated. Did the Earth experience a youth without plate tectonics? And if so, when did it start? These major scientific issues are still to be resolved. Fragments of the oldest continents preserved to the present day, such as the granitoid rocks formed during the Archean period, are crucial witnesses to the mechanisms at work in the first billion of years of our planet. The absence of chemical or isotopic tracers prevented for the moment to rule out one of the two hypotheses considered to explain the origin of these primitive rocks: the melting of a hydrated oceanic crust plunging into the Earth's mantle (this subduction thus implying tectonic activity) or the deep melting at the base of an oceanic plateau (without tectonic activity).

A study conducted by Zhengbin Deng, PhD candidate at the IPGP, has shown that the composition of Archean granitoids, and in particular their silicon isotope ratios, are typical of the chemistry of the primitive oceans and very similar to siliceous marine sediments specific to the Archean oceans (the cherts). The presence of this typical isotopic signature in magmas deposited in the Earth's crust can only be explained by the melting of the hydrated oceanic crust plunging into the mantle during a subduction process. This observation thus removes doubts about the origin of these rocks and shows that the Earth already had plate tectonic-type activity 4 billion years ago.



Ref : Deng, Z., Chaussidon, M., Guitreau, M. et al. *An oceanic subduction origin for Archean granitoids revealed by silicon isotopes*. *Nat. Geosci.* 12, 774–778 (2019). DOI : 10.1038/s41561-019-0407-6
Contact : moynier@ipgp.fr



Gneiss d'Acasta, d'où proviennent les échantillons archéens.
Gneiss of Acasta, where the archaeological samples come from.
© Martin Guitreau



Tribord du Marion-Dufresne.
Starboard side of the Marion-Dufresne vessel.
© Mission MAYOBS 2019 - CNRS, IPGP-Université de Paris, IFREMER, BRGM - Océane Foix

Volcan sous-marin au large de Mayotte, retour sur une découverte exceptionnelle

Underwater volcano off the coast of Mayotte, return on an exceptional discovery

Depuis le printemps 2018, de nombreux séismes se sont produits en mer à l'est de Mayotte. Plusieurs d'entre eux, de magnitude supérieure à 5, ont été fortement ressentis par les habitants et ont, par endroits, affecté le bâti. Mayotte n'était jusqu'ici pas considérée comme une île active en termes de volcanisme et de sismicité. Pourtant, elle fait partie de la chaîne volcanique de l'archipel des Comores, où le volcanisme a débuté il y a environ 20 millions d'années, formant les différentes îles de l'archipel telles que Mayotte, Anjouan, Mohéli et Grande Comore. D'après les données existantes qui restent incertaines, les dernières éruptions très explosives à terre à Mayotte dateraient de moins de 7000 ans.

Since the spring of 2018, numerous earthquakes have occurred at sea east of Mayotte. Several of them, of magnitude greater than 5, were strongly felt by the inhabitants and affected the buildings in places. Mayotte was not previously considered an active island in terms of volcanism and seismicity. However, it is part of the volcanic chain of the Comoros archipelago, where volcanism started about 20 million years ago, forming the different islands of the archipelago such as Mayotte, Anjouan, Mohéli and Grande Comore. According to existing data, which remain uncertain, the last highly explosive eruptions on land in Mayotte are less than 7,000 years old.

La quasi-absence d'activité volcanique au cours de la période historique expliquait jusqu'à présent le manque d'observation systématique de l'activité sismique et volcanique, à l'exception des quelques stations sismologiques installées et maintenues par le BRGM. Ces dernières permettaient de détecter les séismes mais n'étaient pas adaptées pour les localiser précisément et comprendre ainsi leur origine.

En conséquence, des opérations d'observation et de recherche ont été menées dès 2019 par plusieurs établissements et laboratoires de recherche français (IPGP, CNRS, BRGM, Ifremer, IPGS, IGN et Laboratoire GéoSciences Réunion) dans le cadre du programme CNRS-INSU « Tellus Mayotte » financé par le ministère de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation et le ministère de la Transition écologique et solidaire.

Début 2019, trois sismomètres couplés à des GPS ont été installés à Mayotte (IPGS et BRGM), ainsi qu'une station sismologique et un GPS sur l'île de Grande Glorieuse (IPGP-OVPF), puis six OBS ont été déployés en mer au large de Mayotte (CNRS-INSU). C'est lors de la campagne océanographique MAYOBS 1 sur le navire Marion Dufresne en mai 2019, conduite par la cheffe de mission Nathalie Feuillet de l'IPGP, qu'un nouveau volcan sous-marin a finalement été découvert, localisé à 50 km à l'est de Petite-Terre.

The lack of volcanic activity during the historical period has until now explained the lack of systematic observation of seismic and volcanic activity, with the exception of the few seismological stations installed and maintained by BRGM. The latter allowed the detection of earthquakes but were not adapted to precisely locate them and thus understand their origin.

As a result, observation and research operations have been carried out since 2019 by several French research institutions and laboratories (IPGP, CNRS, BRGM, Ifremer, IPGS, IGN and Laboratoire GéoSciences Réunion) as part of the CNRS-INSU "Tellus Mayotte"; programme funded by the Ministry of Higher Education, Research and Innovation and the Ministry of "Transition écologique et solidaire".

At the beginning of 2019, three seismometers coupled with GPS were installed in Mayotte (IPGS and BRGM), as well as a seismological station and a GPS on the island of Grande Glorieuse (IPGP-OVPF), then six OBS were deployed at sea off Mayotte (CNRS-INSU). It was during the MAYOBS 1 oceanographic campaign on the ship Marion Dufresne in May 2019, led by IPGP cruise leader Nathalie Feuillet, that a new submarine volcano was finally discovered, located 50 km east of Petite-Terre.



Récupération d'un des OBS (sismomètre de fond marin) mis à l'eau en février 2019. La partie jaune constitue les flotteurs de l'instrument. A droite, le drapeau et les deux tubes (flash et antenne) permettent de visualiser et communiquer avec l'instrument lorsque celui-ci est arrivé à la surface. La partie bleue est composée des batteries, du sismomètre et de l'électronique nécessaire à l'enregistrement des données.

One of the OBS (ocean-bottom seismometers) launched in February 2019 is being recovered. The yellow part is the float of the instrument. On the right, the flag and the two tubes (flash and antenna) make it possible to visualise the instrument and communicate with it when it reaches the surface. The blue part consists of the batteries, seismometer and electronics required for data recording.

© Mission MAYOBS 2019 - CNRS, IPGP-Université de Paris, IFREMER, BRGM - Eric Jacques

Naissance d'un volcan sous-marin observé pour la première fois Birth of a submarine volcano observed for the first time

Cette découverte exceptionnelle a permis d'expliquer les différents phénomènes observés dans la zone depuis un an. Situé à environ 3 500 m de profondeur, la taille de ce nouveau volcan est évaluée à 800 m de hauteur avec une base de 4 à 5 km de diamètre. Les panaches de fluides volcaniques de 2 km de hauteur observés au sommet de l'édifice lors de MAYOBS 1 n'étaient plus visibles lors des campagnes suivantes, mais d'autres, plus petits, ont été détectés lors des campagnes MAYOBS 2, 3 et 4 (de juin à août 2019) sur de nouvelles coulées volcaniques au sud, à l'ouest et au nord de la zone éruptive. Les dernières campagnes ont par ailleurs permis de cartographier plus finement l'ensemble de la zone (zone d'essai sismique principale située à environ 15 km de l'île, volcan actif situé à environ 50 km de l'île et zone d'essai sismique secondaire située entre les deux) à l'aide d'un AUV (robot autonome sous-marin) et des mesures bathymétriques effectuées depuis le Marion Dufresne. Les volumes de lave émis depuis l'été 2018 (plus de 5,1 km³ en 13 mois) et flux éruptifs (de l'ordre de 150-200 m³/s au minimum sur les onze premiers mois et jusqu'à 45 m³/s encore en août 2019) sont exceptionnels et parmi les plus élevés observés pour un volcan effusif depuis l'éruption du Laki (Islande) en 1783.

This exceptional discovery helped explain the different phenomena observed in the area over the past year. Located at a depth of about 3,500 m, the size of this new volcano is estimated at 800 m in height with a base of 4 to 5 km in diameter. The 2 km high volcanic fluid plumes observed at the top of the edifice during MAYOBS 1 were no longer visible during the following campaigns, but smaller ones were detected during MAYOBS 2, 3 and 4 campaigns (from June to August 2019) on new volcanic flows south, west and north of the eruptive zone. The last campaigns have also made it possible to map more precisely the entire area (main seismic swarm zone located about 15 km from the island, active volcano located about 50 km from the island and secondary seismic swarm zone located in between) using an AUV (autonomous underwater robot) and bathymetric measurements taken from the Marion Dufresne. The lava volumes emitted since summer 2018 (more than 5.1 km³ in 13 months) and eruptive flows (of the order of 150-200 m³/s at least over the first 11 months and up to 45 m³/s again in August 2019) are exceptional and among the highest observed for an effusive volcano since the eruption of Laki (Iceland) in 1783.



Réunion improvisée sur les nouvelles données bathymétriques dans la salle PC science du Marion-Dufresne.
Improvised meeting on new bathymetric data in the science HQ room on board the Marion-Dufresne.

© Mission MAYOBS 2019 - CNRS, IPGP-Université de Paris, IFREMER, BRGM - Anne Lemoine

En parallèle du suivi de l'activité en mer, des mesures GPS, complétées par une cartographie radar opérée par les satellites Sentinel-1 de l'ESA, indiquent un basculement de l'ensemble de Mayotte : l'île s'est affaissée (subsidence) d'une quinzaine de centimètres depuis le début de la crise et s'est déplacée vers l'est d'une vingtaine de centimètres. Ces déformations du sol sont cohérentes avec une déflation liée à la vidange d'un réservoir magmatique.

In parallel with the monitoring of activity at sea, GPS measurements, supplemented by radar mapping operated by ESA's Sentinel-1 satellites, indicate a tilting of the whole of Mayotte: the island has subsided (subsidence) by about fifteen centimetres since the beginning of the crisis and has moved eastwards by about twenty centimetres. These ground deformations are consistent with deflation related to the emptying of a magma reservoir.

Création d'un réseau de surveillance opéré par l'IPGP Creation of a monitoring network operated by the IPGP

Pour organiser la réponse scientifique et opérationnelle à ce phénomène géologique de grande ampleur et ainsi permettre une meilleure surveillance, compréhension et gestion de la crise sismo-volcanique et des risques associés, le « réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte » (REVOSIMA) a été mis en place à l'été 2019 avec le soutien de l'État et de la Délégation interministérielle aux risques majeurs Outre-mer (DIRMOM). Il s'appuie sur des stations de mesures à terre (BRGM, IPGP, IPGS, IGN et collaborateurs) et des campagnes océanographiques (Ifremer, IPGP, BRGM et collaborateurs). Ce réseau est opéré par l'IPGP à travers l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF-IPGP), avec le soutien du BRGM et sa direction régionale à Mayotte et en étroite association avec l'Ifremer et le CNRS. Les données du REVOSIMA sont produites par un large consortium de partenaires scientifiques français (Ifremer, CNRS, IPGP, BRGM, RENASS-BCSF, IPGS, IGN, ENS, SHOM, Météo France, CNES, les TAAF, IRD, Université de Paris, Université de La Réunion, Université Clermont Auvergne, LMV et OPGC, Université de la Rochelle, Université de Strasbourg, Université Grenoble Alpes et ISTERre, Université Toulouse 3 Paul Sabatier et GET-OMP, GéoAzur) et son financement est assuré par l'État (Ministère de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, Ministère de la Transition écologique et solidaire, Ministère de l'Intérieur, Ministère des Outre-mer). Les données sismiques et GNSS sont distribuées par l'IPGP (<http://volobsis.ipgp.fr/>), RESIF, le RENASS, le RGP et ont le soutien du Service national d'observation en volcanologie (SNOV-INSU). Depuis décembre 2019, le REVOSIMA peut s'appuyer sur six nouveaux postes permanents de chercheurs, ingénieurs et techniciens, afin de mener à bien sa mission de surveillance du quatrième volcan actif français d'Outre-mer. Le REVOSIMA publie régulièrement un bulletin d'information, disponible sur son site internet (www.ipgp.fr/revosima) et sa page Facebook (www.facebook.com/ReseauVolcanoSismoMayotte).

In order to organize the scientific and operational response to this large-scale geological phenomenon and thus enable better monitoring, understanding and management of the seismic-volcanic crisis and associated risks, the "Mayotte Volcanological and Seismological Monitoring Network"; (REVOSIMA) was set up in the summer of 2019 with the support of the French government and the Interministerial Delegation for Major Overseas Risks (DIRMOM). It relies on land-based measurement stations (BRGM, IPGP, IPGS, IGN and collaborators) and oceanographic campaigns (Ifremer, IPGP, BRGM and collaborators). This network is operated by the IPGP through the Piton de la Fournaise volcanological observatory (OVPF-IPGP), with the support of BRGM and its regional office in Mayotte and in close association with Ifremer and CNRS. REVOSIMA data are produced by a large consortium of French scientific partners (Ifremer, CNRS, IPGP, BRGM, RENASS-BCSF, IPGS, IGN, ENS, SHOM, Météo France, CNES, the TAAF, IRD, Université de Paris, Université de La Réunion, Université Clermont Auvergne, LMV and OPGC, Université de la Rochelle, Université de Strasbourg, Université Grenoble Alpes and ISTERre, Université Toulouse 3 Paul Sabatier and GET-OMP, GeoAzur) and its funding is provided by the State (Ministry of Higher Education, Research and Innovation, Ministry of Ecological and Solidarity Transition, Ministry of the Interior, Ministry of Overseas France). Seismic and GNSS data are distributed by the IPGP (<http://volobsis.ipgp.fr/>), RESIF, RENASS, RGP and are supported by the National Volcanic Observing Service (SNOV-INSU). Since December 2019, REVOSIMA can rely on six new permanent researchers, engineers and technicians staffs to carry out its mission of monitoring France's fourth active volcano overseas. REVOSIMA regularly publishes a newsletter, available on its website (www.ipgp.fr/revosima) and its Facebook page (www.facebook.com/ReseauVolcanoSismoMayotte).



Le nouveau laboratoire d'archéomagnétisme à Chambon-la-Forêt.
The new archaeomagnetic laboratory at Chambon-la-Forêt.
© IPGP

L'archéomagnétisme à l'IPGP Archaeomagnetism at the IPGP

L'IPGP a une longue tradition de recherches en archéomagnétisme. Cette discipline à la croisée du paléomagnétisme, du géomagnétisme et de l'archéologie permet de retracer la variation séculaire du champ géomagnétique au cours des derniers millénaires. Elle repose sur l'analyse des propriétés magnétiques des objets archéologiques ayant subi une cuisson lors de leur fabrication ou de leur utilisation, comme les fours de potiers, les fours domestiques, les briques architecturales ou les poteries.

Les analyses sont réalisées à l'IPGP grâce à une instrumentation spécialement dédiée à l'archéomagnétisme. L'acquisition de nombreuses données en Europe de l'ouest (principalement en France) et au Proche-Orient permet d'établir des courbes régionales de variation séculaire toujours plus précises (Fig. 1) et contribue à mieux caractériser l'évolution globale du champ géomagnétique au travers des derniers millénaires. L'archéomagnétisme est aussi utilisé comme outil de datation pour des structures de combustion dont l'âge archéologique est mal contraint (Fig. 2).

Suite à la fermeture du site de Saint-Maur, le laboratoire historique d'archéomagnétisme a été scindé en deux unités. La première, concentrée sur les mesures de l'intensité du champ géomagnétique, est désormais installée dans le bâtiment Cuvier à Paris. La seconde,

The IPGP has a long tradition of research in archaeomagnetism. This discipline at the crossroads of paleomagnetism, geomagnetism and archaeology allows us to trace the secular variation of the geomagnetic field over the last millennia. It is based on the analysis of the magnetic properties of archaeological objects that underwent firing during their manufacture or use, such as pottery kilns, domestic ovens, architectural bricks and pottery.

Analyses are carried out at the IPGP thanks to instrumentation specially dedicated to archaeomagnetism. The acquisition of numerous data in Western Europe (mainly in France) and the Near East makes it possible to establish regional curves of secular variation that are increasingly precise (Fig. 1), and contributes to better characterising the global evolution of the geomagnetic field over the last millennia. Archaeomagnetism is also used as a dating tool for combustion structures whose archaeological age is poorly delimited (Fig. 2).

Following the closure of the Saint-Maur site, the historical archaeomagnetism laboratory was split into two units. The first, focused on geomagnetic field strength measurements, is now set up in the Cuvier building in Paris. The second, focused on the directional variations of the ancient geomagnetic field, is located in the National Magnetic Observatory in Chambon-la-Forêt. Beyond a certain thematic coherence, since archaeomagnetism

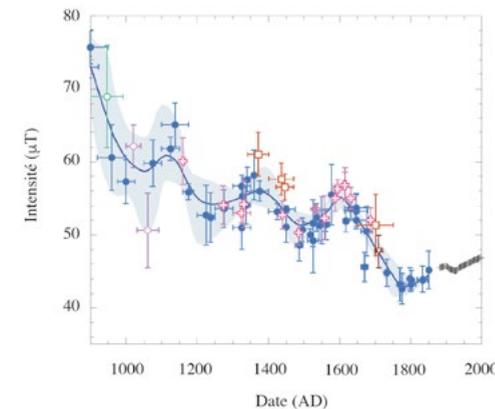


Figure 1 : Variations de l'intensité du champ géomagnétique en France durant le dernier millénaire (Genevey et al., 2019). Toutes les données (différents symboles) ont été reportées à Beaune. La courbe moyenne et son intervalle de confiance à 95% (en bleu) est déterminée à partir d'une méthode Bayésienne trans-dimensionnelle.
Variations in the intensity of the geomagnetic field in France during the last millennium (Genevey et al., 2019). All the data (different symbols) have been reported in Beaune. The mean curve and its 95% confidence interval (in blue) is determined using a trans-dimensional Bayesian method.
© Livermore et al., 2018

focalisée sur les variations directionnelles du champ géomagnétique ancien, est située au sein de l'observatoire magnétique national à Chambon-la-Forêt. Au-delà d'une certaine cohérence thématique, l'archéomagnétisme venant prolonger dans le temps les enregistrements géomagnétiques réalisés à l'observatoire, ce choix s'explique par la nature même des mesures archéomagnétiques qui nécessitent des conditions magnétiques stables ainsi qu'un vaste laboratoire pour mener des expériences de traînage magnétique sur des échantillons de taille décimétrique. L'installation a été achevée en 2019 et plus d'une vingtaine de fours de potiers et de fours domestiques ont d'ores et déjà été analysés.

extends the geomagnetic recordings made at the observatory over time, this choice is explained by the very nature of archaeomagnetic measurements, which require stable magnetic conditions and a large laboratory to conduct magnetic drag experiments on decimetre-sized samples. The installation was completed in 2019 and more than twenty pottery kilns and domestic ovens have already been analysed.

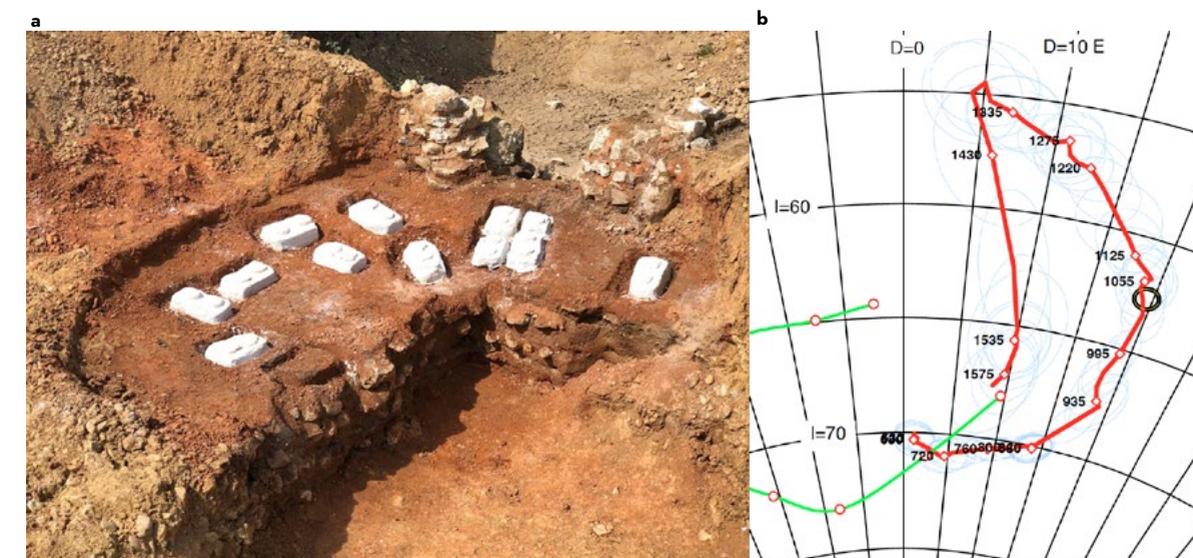


Figure 2 : Datation archéomagnétique d'un four domestique trouvé à Anet (Eure et Loir). (a) Vue du four, avec les échantillons en cours de prélèvement. (b) Comparaison entre la direction archéomagnétique trouvée à Anet (ovale en noir) et la courbe de référence française des variations directionnelles du champ géomagnétique déterminées par archéomagnétisme entre 500 et 1600 AD (en rouge). D pour Déclinaison, I pour Inclinaison. La datation archéomagnétique à 95% est [995-1110 AD] avec un âge plus probable entre 1010 et 1040 AD.
Archaeomagnetic dating of a domestic oven found at Anet (Eure et Loir). (a) View of the oven, with the samples being taken. (b) Comparison between the archaeomagnetic direction found at Anet (oval in black) and the French reference curve of the directional variations of the geomagnetic field determined by archaeomagnetism between 500 and 1600 AD (in red). D for Declination, I for Inclination. The 95% archaeomagnetic dating is [995-1110 AD] with a more probable age between 1010 and 1040 AD.
© IPGP - Y. Gallet, 2019



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 de la plus haute qualité. Il fait partie du « Bureau Central de Magnétisme Terrestre » (BCMT) qui est un « Service National d'Observation » (SNO) du CNRS-INSU. L'IPGP maintient onze observatoires, en collaboration avec des institutions françaises et internationales : l'observatoire magnétique national de Chambon-la-Forêt et ceux de Borok (Russie), Dalat (Vietnam), Île de Paques (Chili), Edéa (Cameroun), Kourou (Guyane), Lanzhou (Chine), M'bour (Sénégal), Phu Thuy (Vietnam), Pamatai (Polynésie française) et Tamanrasset (Algérie). Ils sont opérés par des observateurs spécifiquement formés pour effectuer les mesures d'étalonnage hebdomadaires et font partie du réseau INTERMAGNET, une organisation internationale d'observatoires magnétiques. 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). Toutes ces données sont distribuées sur le portail web du BCMT (www.bcmt.fr), celui d'INTERMAGNET (www.intermagnet.org), mais aussi à travers les centres de données mondiaux (World Data Centres - WDC) pour les données magnétiques au Royaume-Uni, aux USA et au Japon (exemple : www.wdc.bgs.ac.uk). 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 ou comme outils pour le suivi de la météorologie de l'espace.

The IPGP's Magnetic Observatories service provides ground-based observations of the Earth's magnetic field and derived products of the highest quality. It is part of the "Bureau Central de Magnétisme Terrestre"; (BCMT) which is a "Service National d'Observation"; (SNO) of the CNRS-INSU. The IPGP maintains eleven observatories, in collaboration with French and international institutions: the national magnetic observatory of Chambon-la-Forêt and those of Borok (Russia), Dalat (Vietnam), Easter Island (Chile), Edéa (Cameroon), Kourou (Guyana), Lanzhou (China), M'bour (Senegal), Phu Thuy (Vietnam), Pamatai (French Polynesia) and Tamanrasset (Algeria). They are operated by observers specifically trained to perform the weekly calibration measurements and are part of the INTERMAGNET network, an international organization of magnetic observatories. The observations made are both highly accurate and highly stable over the long term. The observatories provide real-time, quasi-definitive and definitive data, which are distributed as seconds, one-minute averages or over longer periods (hour, day, month, year). All these data are distributed through the BCMT web portal (www.bcmt.fr), the INTERMAGNET web portal (www.intermagnet.org), but also through the World Data Centres (WDCs) for magnetic data in the UK, USA and Japan (e.g: www.wdc.bgs.ac.uk). These data are used primarily for research activities (dynamics of the Earth's liquid core, mantle conductivity, crustal structure, ionosphere and magnetosphere dynamics), but also as orientation references for industry or as tools for monitoring space weather.

Activités en 2019 Activities in 2019

> Instrumentation : Dans le cadre de la modernisation des magnétomètres qui équipent les observatoires magnétiques de l'IPGP, une nouvelle électronique pour les magnétomètres vectoriels a été développée. Toujours basée sur le capteur de type VM391, utilisé actuellement dans l'ensemble du réseau d'observatoires magnétiques de l'IPGP, cette nouvelle électronique utilise le convertisseur numérique analogique 20 bits le plus performant du marché, permettant ainsi d'obtenir une grande dynamique (+/- 65000nT). Il est désormais possible de calibrer les instruments plus facilement, de mieux connaître les paramètres de dépendance à la température et ainsi d'améliorer la stabilité des mesures. Animé par un « System On Chip » Smartfusion2, le nouveau magnétomètre numérique est entièrement paramétrable. Il sera également utilisé pour l'étape suivante consistant à développer un nouveau capteur magnétique vectoriel.

> Stabilité des systèmes d'acquisition : un observatoire foudroyé pouvant engendrer la perte de plusieurs mois de données, le système de protection de l'ensemble des observatoires équatoriaux de l'IPGP a été revu et amélioré afin d'éviter que leurs instruments ne soient détériorés par la foudre ou par des instabilités d'alimentation électrique (coupure, sur-tension) comme cela arrive régulièrement.

> Qualité des données : afin de fournir rapidement des séries de données aux services de météorologie spatiale aussi complètes et fiables que possible, un nouveau système d'acquisition et de distribution a été développé. Actuellement en test à l'observatoire national, le nouveau système gère correctement les secondes intercalaires et distribue des séries de données consolidées toutes les 5 minutes (au lieu d'une heure précédemment), notamment pour permettre la comparaison des données d'observatoires avec d'autres types d'informations. Exploitant également les algorithmes de calibration des données nouvellement développés par l'équipe, un nouveau logiciel de traitement est en cours de conception pour gérer de manière optimale ce nouveau flux de données.

> Développements de modèles : le modèle international de champ magnétique de la Terre IGRF est mis à jour tous les cinq ans pour prendre en compte les évolutions les plus récentes du champ. Les données de l'ensemble des observatoires de l'IPGP ont ainsi été utilisées par les différentes équipes de recherche participant à cette treizième version (IGRF-13) qui couvre la période 2020-2025.

> Instrumentation: As part of the modernization of the magnetometers functioning at the IPGP's magnetic observatories, new electronics for vector magnetometers have been developed. Still based on the VM391 type sensor, currently used throughout the IPGP's network of magnetic observatories, these new electronics uses the most powerful 20-bit digital-analogue converter on the market, thus making it possible to obtain a high dynamic range (+/- 65000nT). It is now possible to calibrate the instruments more easily, to better understand the temperature dependence parameters and thus to improve the stability of the measurements. Powered by a Smartfusion2 "system On Chip", the new digital magnetometer is fully configurable. It will also be used for the next step of developing a new magnetic vector sensor.

> Stability of the acquisition systems: since a lightning strike at an observatory can cause the loss of several months of data, the protection system of all the IPGP equatorial observatories has been reviewed and improved in order to prevent their instruments from being damaged by lightning or by power supply instability (cut-off, over-voltage) as happens regularly.

> Data quality: in order to provide the space weather services with data sets that are as complete and reliable as possible, a new acquisition and distribution system has been developed. Currently being tested at the national observatory, the new system correctly manages leap seconds and distributes consolidated data sets every 5 minutes (instead of every hour previously), in particular to allow the comparison of observatory data with other types of information. Also exploiting the data calibration algorithms newly developed by the team, new processing software is being designed to optimally manage this new data flow.

> Model developments: The International Earth Magnetic Field Model IGRF is updated every five years to take into account the most recent developments in the field. Data from all IPGP observatories were thus used by the various research teams participating in this thirteenth version (IGRF-13), which covers the period 2020-2025.



Magnétomètre sur le banc de calibration de l'observatoire magnétique national de Chambon-la-Forêt.
Magnetometer on the calibration bench of the national magnetic observatory of Chambon-la-Forêt.
© IPGP

[sommaire/contents](#)



La mission de l'observatoire GEOSCOPE est de fournir des données sismologiques large bande validées, de haute qualité, aux communautés sismologiques française et internationale. GEOSCOPE est constitué d'un réseau de 34 stations sismologiques, toutes équipées pour fournir des données en temps réel. GEOSCOPE est en premier lieu dédié aux travaux de recherche : ses données sont ainsi utilisées pour l'étude de la structure et de la dynamique terrestres, pour l'étude des sources sismiques, pour le suivi temporel des phénomènes de déformation ou encore pour la sismologie environnementale. L'observatoire fournit également ses données en temps réel aux organismes d'alerte des séismes et des tsunamis partout dans le monde.

GEOSCOPE est géré conjointement par l'IPGP à Paris et par l'EOST à Strasbourg. L'IPGP assure l'instrumentation et la maintenance de 24 stations, ainsi que la mise à disposition de toutes les données à travers son centre de données. Ces données sont également disponibles via les centres de données RESIF et IRIS. Ces données sont largement utilisées par la communauté scientifique (environ 1350 publications mentionnent explicitement GEOSCOPE depuis 1982, liste disponible sur le site de GEOSCOPE), mais également par l'observatoire lui-même afin de fournir des analyses telles que l'estimation rapide des paramètres de sources d'un tremblement de terre (catalogue disponible sur le site de GEOSCOPE). L'équipe est composée de 10 personnes, 6 à l'IPGP et 4 à l'EOST (4 chercheurs ou enseignants-chercheurs, 5 ingénieurs et un administratif).

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

GEOSCOPE is jointly managed by the IPGP in Paris and the EOST in Strasbourg. The IPGP provides instrumentation and maintenance for 24 stations, as well as the provision of all data through its data center. These data are also available via the RESIF and IRIS data centers. These data are widely used by the scientific community (about 1,350 publications explicitly mention GEOSCOPE since 1982, list available on the GEOSCOPE website), but also by the observatory itself to provide analyses such as the rapid estimation of earthquake source parameters (catalogue available on the GEOSCOPE website). The team is composed of 10 people, 6 at the IPGP and 4 at the EOST (4 scientific staffs, 5 engineers and one administrative staff).

Figure 1 : Vue du puits d'installation à la nouvelle station EDA (Cameroun) : vue avant installation du capteur (à gauche) et après (à droite), juste avant le rebouchage du trou. Le capteur T120PH est au fond du tube.
View of the installation well at the new EDA station (Cameroon): view before installation of the sensor (left) and after (right), just before plugging the hole. The T120PH sensor is at the bottom of the pipe.
© IPGP



Activités en 2019 Activities in 2019

> **Nouvelle station au Cameroun** : En avril 2019, la station EDA a été installée à proximité de la ville d'Edea. Un capteur T120PH a été mis en place au fond d'un puits de 4 mètres de profondeur (Fig. 1). La qualité du site se révèle très bonne, voire excellente sur la composante verticale.

> **Travaux pour améliorer et entretenir le réseau existant** : à IVI (Groenland), modification de la communication et amélioration de la consommation d'énergie, pour permettre à cette station de fonctionner continuellement sur l'année. Pour les stations de Guyane (MPG) et d'Alsace (ECH), amélioration de la transmission et de la protection foudre. Poursuite des travaux de préparation pour la nouvelle instrumentation de la station sur la base de Concordia (CCD, Antarctique), le forage étant creusé désormais (Fig. 2).

> **New station in Cameroon**: In April 2019, the EDA station was installed near the town of Edea. A T120PH sensor was installed at the bottom of a 4-meter deep well (Fig. 1). The quality of the site is very good, even excellent on the vertical component.

> **Work to improve and maintain the existing network**: at IVI (Greenland), modification of the communication and improvement of energy consumption, to enable this station to operate continuously throughout the year. For the stations in French Guiana (MPG) and Alsace (ECH), improvement of lightning transmission and protection. Continuation of the preparation work for the new instrumentation of the station on the Concordia base (CCD, Antarctica), with the borehole now being drilled (Fig. 2).

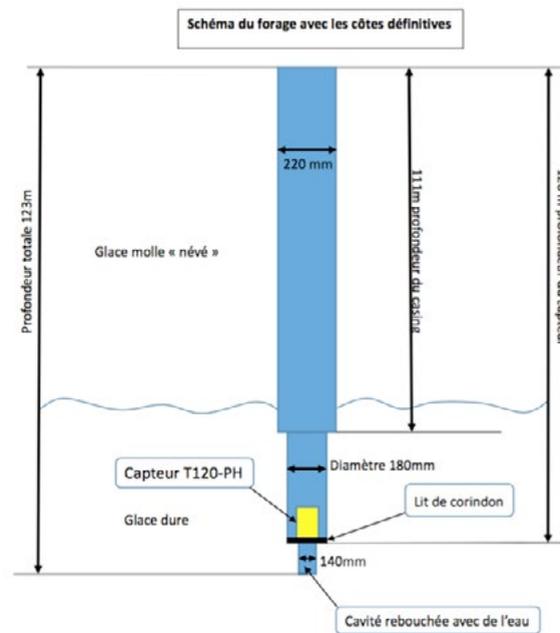


Figure 2 : Schéma du forage creusé en 2019 à la base de Concordia (Antarctique, station CCD) en vue d'accueillir le futur capteur GEOSCOPE, qui sera placé en fond de puits à 120 m de profondeur. Diagram of the borehole dug in 2019 at the Concordia base (Antarctica, CCD station) to accommodate the future GEOSCOPE sensor, which will be placed downhole at a depth of 120 m.

© IPGP

> **Anticipation du vieillissement des capteurs large-bande STS1** : Mise en place d'une structure de test sur notre station dans la Loire (SSB) grâce au financement obtenu sur l'appel d'offre interne IPGP. Choix d'une stratégie mixte entre achat de capteurs de nouvelle génération (un T360 commandé en 2019) et amélioration de la longévité des STS1.

> **Amélioration de la diffusion des produits dérivés** mis en place par l'observatoire, en particulier concernant les informations sur les séismes récents. Nous avons aujourd'hui près de 2200 abonnés au compte twitter @geoscope_ipgp fournissant ces informations, par rapport aux 1300 de l'année dernière.

> **Nouvelles mises en évidence de la qualité des données GEOSCOPE**. Les stations à bas bruit constituent la majorité du réseau et ont permis depuis les débuts de GEOSCOPE des analyses fines de la structure terrestre et des sources sismiques. Nous avons montré en 2019 que les stations sont capables de détecter les nouveaux signaux d'élastogravité précoces, comme le prouve l'enregistrement de la station NOUC (Fig. 3) pendant le séisme des Iles Fidji d'août 2018 (Vallée and Juhel, JGR, 2019).

> **Anticipation of ageing of STS1 broadband sensors**: Setting up of a test structure on our station in the Loire (SSB) thanks to the funding obtained from the IPGP internal call for tenders. Choice of a mixed strategy between purchasing new generation sensors (a T360 ordered in 2019) and improving the longevity of the STS1.

> **Improving the dissemination of the derived products** set up by the observatory, in particular concerning information on recent earthquakes. We now have nearly 2,200 subscribers to the twitter account @geoscope_ipgp providing this information, compared to 1,300 last year.

> **New highlights of GEOSCOPE data quality**. Low-noise stations make up the majority of the network and have allowed, since the beginning of GEOSCOPE, fine analyses of the Earth's structure and seismic sources. We have shown in 2019 that stations are able to detect new elastogravity signals early, as shown by the NOUC station registration (Fig. 3) during the Fiji earthquake of August 2018 (Valley and Juhel, JGR, 2019).



Ref. : Vallée, M. & Juhel, K., Multiple observations of the prompt elastogravity signals heralding direct seismic waves, *J. Geophys. Res.*, 124, 2970-2989, 2019, DOI: 10.1029/2018JB017130

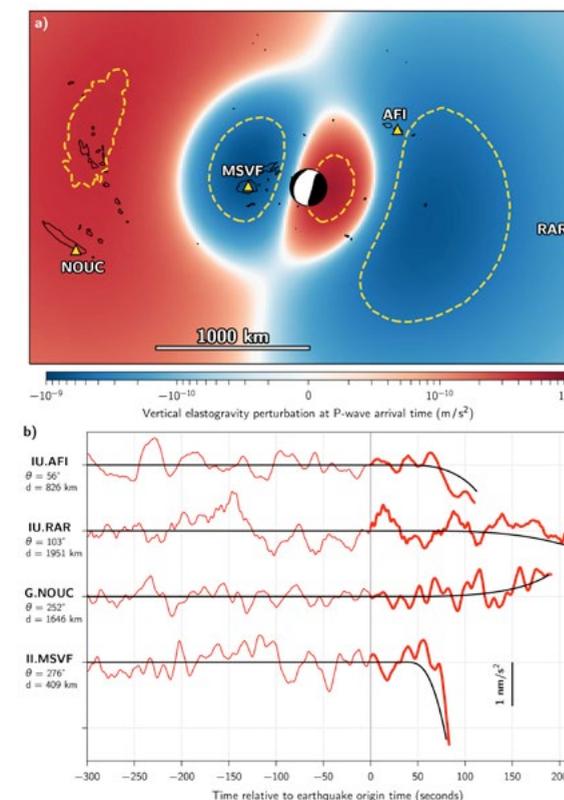


Figure 3 : Signaux d'élastogravité précoces (avant l'onde P) enregistrés pendant le séisme des Fidji du 19/08/2018 (magnitude 8.2). a) Amplitudes attendues en fonction de la localisation des stations. b) Signaux observés (en rouge) conformes aux modélisations attendues (en noir). C'est en particulier le cas à la station GEOSCOPE NOUC (Nouvelle Calédonie) qui bénéficie d'un bruit sismique minimal. Early elastogravity signals (before P-wave) recorded during the Fiji earthquake of 19/08/2018 (magnitude 8.2). a) Expected amplitudes according to the location of the stations. b) Observed signals (in red) consistent with the expected patterns (in black). This is particularly the case at the GEOSCOPE NOUC station (New Caledonia), which has minimal seismic noise.

© Vallée et Juhel, 2019



L'observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles (ObsERA) étudie l'évolution des variables environnementales (pluviométrie, débit des rivières, conductivité, charge sédimentaire, composition chimique des sols, précipitations, etc.) dans quatre bassins versants de l'île de Basse-Terre, une île volcanique de l'archipel de Guadeloupe (arc des Petites Antilles). ObsERA mesure également l'évolution de la granulométrie et la morphologie de plusieurs rivières en utilisant des images aériennes acquises par un drone. Les objectifs d'ObsERA sont multiples : étudier l'érosion physique et chimique et son influence sur les grands cycles biogéochimiques dans le contexte particulier d'une île tropicale volcanique ; promouvoir le développement de nouveaux instruments et de nouvelles méthodes d'étude de l'environnement et des écosystèmes ; étudier de quelle manière les événements extrêmes (crues éclairées, tempêtes tropicales, tremblements de terre, etc.) influencent les cycles géochimiques (comme le cycle du carbone), les taux d'érosion et la morphologie des paysages. ObsERA est membre de la Très Grande Infrastructure de Recherche (TGIR) OZCAR (Observatoires de la Zone Critique Applications et Recherches). Les données de l'observatoire sont mises à la disposition de la communauté scientifique sur le site : <http://webobsera.ipgp.fr>

The Observatory of Water and Erosion in the Antilles (ObsERA) monitors the evolution of environmental variables (e.g. rainfalls, river discharge, conductivity, sediment load, chemical composition of soils, rivers and precipitations, etc.) in four catchments located on Basse-Terre Island, a volcanic island of the Guadeloupe archipelago (Lesser Antilles arc). ObsERA also monitors the granulometry and the morphology of several river reaches using drone-acquired aerial images. The objectives of ObsERA are: to investigate chemical and physical erosion, their feedbacks and their influence on the carbon and water cycles and the environment in the peculiar context of a tropical volcanic island; to promote the development of new instruments and methods for studying the environment and ecosystems; to investigate how extreme events (floods induced by heavy rains and tropical storms, earthquakes, etc.) affect geochemical cycles (e.g. carbon cycle), erosion rates and landscape morphology. ObsERA is involved in the creation of the Very Large Research Infrastructure (TGIR) OZCAR. The data from ObsERA are made freely available to the scientific community on the website: <http://webobsera.ipgp.fr>

Contrôle de la forme des crues par l'écoulement des eaux souterraines Influence of groundwater flow on stream-discharge surges

Lors d'un épisode de pluie, l'eau s'infiltrate dans le sol et s'accumule dans l'aquifère. Elle y forme une nappe qui s'écoule vers la rivière voisine. Bien que ce voyage souterrain soit souvent très long (jusqu'à plusieurs milliers d'années), les eaux souterraines peuvent contribuer rapidement aux inondations. Pour comprendre comment un écoulement souterrain peut être si réactif, l'équipe de l'observatoire a suivi en continu l'évolution de la nappe du bassin de la rivière Quiock pendant trois ans (Fig. 1).

Rainwater infiltrates into the ground, accumulates in porous rocks, and eventually flows towards a neighboring stream. Although this underground travel often takes millennia, groundwater can contribute quickly to floods. To understand how an underground flow can be so responsive, the observatory team has continuously monitored the motion of the groundwater surface in the Quiock creek catchment during three years (Fig. 1).

Les données récoltées montrent que la nappe s'élève dans les minutes qui suivent un événement pluvieux. Le signal de pression généré par cette déformation pousse l'eau de la nappe vers la rivière dont le débit augmente instantanément. Sous l'effet de ce mécanisme, le pic de crue augmente plus vite (non-linéairement) que l'intensité des

The researchers find that groundwater swells within minutes of a rain event, and that this deformation directly pushes more water into the stream. The resulting stream-discharge peak raises quicker than the rainfall intensity: a three-fold increase of the latter causes a five-fold increase of the stream discharge. Including this mechanism into flood-forecasting models should allow the researchers to

précipitations : multiplier par trois le taux de précipitation augmente cinq fois l'intensité du pic de crue. La prise en compte de ce mécanisme dans les modèles de prévision des crues devrait permettre de mieux prévoir l'impact des précipitations extrêmes. Pour finir, les chercheurs introduisent une méthode permettant de mesurer la quantité d'eau qu'un aquifère stocke lors d'un événement pluvieux, avant de la restituer ; un paramètre central pour la gestion des ressources en eau.

better predict the impact of extreme precipitations. Finally, they introduce a method to measure how much water an aquifer stores during a rainfall event, before its release ; a key parameter for the management of water resources.



Ref. : Guerin, A., Devauchelle, O., Robert, V., Kitou, T., Dessert, C., Quiquerez, A., Allemand, P. & Lajeunesse, E. (2019). Stream-discharge surges generated by groundwater flow. *Geophysical Research Letters*, 46, 7447– 7455. DOI: 10.1029/2019GL082291

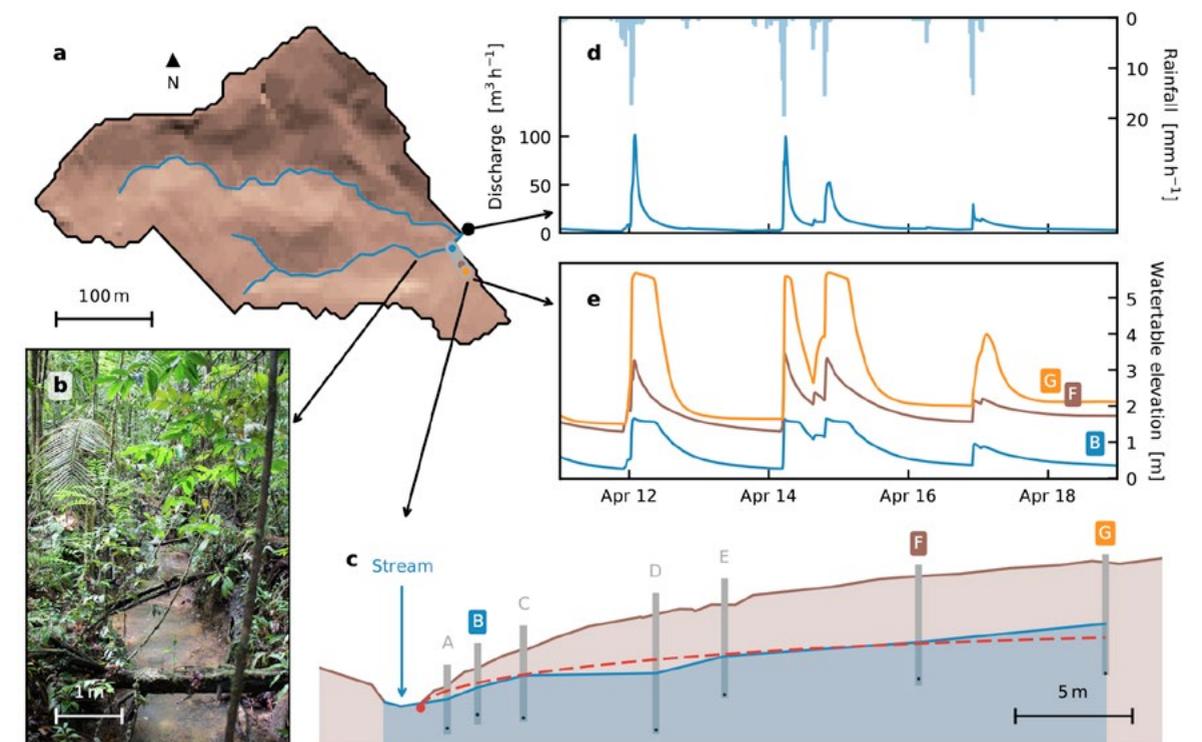


Figure 1 : Bassin instrumenté de la ravine Quiock (Guadeloupe).
(a) Carte du bassin (16 10° 36' N, 61 41° 44' W) avec la position (points noirs) des piézomètres .
(b) Photo de la ravine Quiock 10 m en amont de la zone de mesure.
(c) Vue en coupe du bassin versant avec la hauteur moyenne de la nappe (en bleu) entre janvier 2015 et octobre 2017, la surface du sol (marron) et la position des piézomètres (gris).
(d) Débit de la rivière et taux de précipitation (avril 2015).
(e) Hauteur de la nappe par rapport au niveau de la rivière à 2,4, 21 et 29 m de la rivière.

Instrumented catchment of the Quiock creek (Guadeloupe).
(a) Map of the catchment (16 10° 36' N, 61 41° 44' W). Dots indicate piezometric wells.
(b) Quiock creek about 10 m upstream of measurements.
(c) Cross section of the shallow aquifer. Blue line shows the root mean square of the water table profile, hRMS, from January 2015 to October 2017. Brown shaded area, grey lines and black dots indicate ground surface, boreholes and pressure sensors respectively.
(d) Time series of the stream discharge and rainfall rate (April 2015).
(e) Time series of the water-table elevation, with respect to stream level, at 2.4, 21 and 29 m from the river.
© IGP



Observatoires volcanologiques et sismologiques Volcanological and seismological observatories

L'IPGP est en charge de la surveillance des quatre volcans actifs français, ainsi que de leur sismicité régionale, situés dans les territoires français d'outre-mer (La Soufrière de Guadeloupe, la Montagne Pelée en Martinique, le Piton de la Fournaise à La Réunion et à Mayotte). Il enregistre également la sismicité régionale permanente associée aux risques potentiels de formation de tsunamis. Les observatoires volcanologiques et sismologiques (OVSG, OVSM, OVPF, REVOSIMA) de l'IPGP ont vocation à :

- 1) observer et étudier les phénomènes volcaniques dans leur contexte sismo-tectonique via la mise en œuvre d'une surveillance permanente en temps réel et de programmes de recherche en sciences de la Terre, dans le but d'améliorer la compréhension et la modélisation des processus volcaniques au sein des volcans actifs ;
- 2) constituer des bases de données multiparamètres pérennes à la disposition de la communauté scientifique ;
- 3) détecter tout changement dans la dynamique des systèmes sismo-volcaniques et de la sismicité régionale afin d'informer et éventuellement alerter les autorités en charge de la protection civile et la réduction des risques ;

The IPGP is in charge of monitoring the four active volcanoes, and their regional seismicity, that are located in the French overseas territories (La Soufrière of Guadeloupe, the Montagne Pelée in Martinique, the Piton de la Fournaise in La Réunion and in Mayotte) and recording the permanent regional seismicity associated with hazards of potential tsunamis formation. The volcanological and seismological observatories (OVSG, OVSM, OVPF, REVOSIMA) of the IPGP are dedicated to:

- 1) observe and study volcanic phenomena in their sismo-tectonic context through real-time long-term volcano monitoring and Earth Science research programs to improve the understanding and modelling of volcanic processes at active volcanoes ;
- 2) to build up long-term multi-parameters databases available to the scientific community ;
- 3) to detect changes in the dynamics of the sismo-volcanic systems and regional seismicity to alert and inform the authorities in charge of civil protection and risk mitigation ;
- 4) to communicate and disseminate knowledge to civil society.

4) diffuser le plus largement possible les connaissances scientifiques acquises auprès de la société civile.

Ces missions sont menées dans le cadre du Service National d'Observation en Volcanologie (SNOV), en partenariat avec l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (OPGC) et le LMV (Laboratoire Magmas et Volcans) de l'Université Clermont Auvergne.

Au cours des seize dernières années, les observatoires antillais, en collaboration avec le Centre de recherche sismique de l'Université des Indes occidentales (UWI-SRC), ont modernisé les réseaux de surveillance sismique et géodésique de l'Arc des Petites Antilles grâce au transfert par satellite de données en temps réel. Le réseau mondial du consortium IPGP-SRC couvre l'ensemble de l'arc antillais et alimente le système d'alerte aux tsunamis des Caraïbes soutenu par l'UNESCO. En 2018, le projet PREST, mené par l'OVSM (Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique), a été financé par INTERREG afin de mettre en place une plateforme régionale de surveillance tellurique des fonds marins de haut niveau avec un consortium de partenaires scientifiques régionaux et nationaux. En 2019, la conception de différentes parties de la plateforme (plateforme marine multi-capteurs, nouvelle génération d'OBS à réponse rapide et station sismique sous-marine temps réel) a été lancée et les premiers tests ont été effectués, pour un déploiement en 2020-2021.

L'éruption sous-marine majeure au large de l'île de Mayotte, territoire français d'outre-mer situé dans le canal du Mozambique (océan Indien), a produit depuis le mois de mai 2018 plusieurs milliers de séismes, dont beaucoup ont été ressentis par la population de Mayotte (plus de 2023 événements > M3,5 dont deux événements > M5,5) et au moins 5 km³ de magma. Le caractère inhabituel de cette éruption de grande magnitude et de longue durée et les risques associés pour la population de Mayotte, et plus largement de cette partie de l'océan Indien, ont nécessité le financement et la mise en place du nouveau Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA), à la demande du gouvernement français, pour ce qui est désormais la quatrième zone volcanique active de France. Dans le cadre de cette réponse scientifique sans précédent en France depuis l'éruption de la Soufrière de Guadeloupe en 1976, un financement et un soutien opérationnel importants ont été obtenus du gouvernement français pour l'organisation de 12 campagnes océanographiques d'observation et de mesures et le déploiement d'OBS entre février et décembre 2019. **Plus d'informations sur cette découverte exceptionnelle page 58.**

These missions are also conducted in the framework of the National Service for Observation in Volcanology (SNOV) of France in partnership with the Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (OPGC) and the LMV (Laboratoire Magmas et Volcans) at Université Clermont Auvergne.

In the last sixteen years, the French West Indies observatories in collaboration with the UWI Seismic Research Centre (SRC, University of West Indies), have modernized the Lesser Antilles Arc seismic and geodetic monitoring networks with satellite communication for real-time data transfer. The global network of the IPGP-SRC consortium covers the whole Antilles arc and feeds the Caribbean Tsunami Warning System supported by UNESCO. In 2018, a project led by the OVSM-IPGP has been funded by the INTERREG. This project named PREST aims at building a Regional Platform for State-of-the-art Telluric monitoring on ocean bottom with a consortium of national and regional scientific partners. In 2019, designs of different parts of the platform (multisensor marine platform, rapid response new OBS generation and real-time underwater seismic station) were initiated and the first tests performed before deployment in 2020-2021.

The major submarine eruption offshore of Mayotte island, a French overseas territory in the Mozambique Channel (Indian Ocean), since May 2018 has produced thousands of earthquakes, many felt by the population on Mayotte (more than 2,023 events > M3,5 including two events > M5,5) and at least 5 km³ of magma. The unusualness of this large magnitude and long duration eruption and the resulting risks to the population of Mayotte and more widely this part of the Indian Ocean have required the design, funding, organization, and implementation of the new Volcanological and Seismological Monitoring Network of Mayotte (REVOSIMA) at the request of the French government, for what is now France's fourth active volcanic area. As part of this unprecedented scientific response in France since the eruption of La Soufrière of Guadeloupe in 1976, major funding and operational support have been obtained from the French government to finance 12 oceanographic campaigns of observation and measurements, and OBS deployment between February and December 2019. **More information about this exceptional discovery on page 58.**

Les observatoires collaborent étroitement avec le centre de données de l'IPGP pour la diffusion de leurs données volcanologiques et sismologiques à destination de la communauté scientifique via les centres de données nationaux et internationaux (RESIF, FDSN-IRIS-DMC) et le portail d'accès aux données VOLOBISIS. Ils travaillent aussi dans le cadre d'EPOS à l'harmonisation des normes relatives aux données et aux métadonnées au niveau européen. Les observatoires et le centre de données IPGP ont également travaillé en 2019 avec le RENASS-BCSF à la mise en place prochaine d'un accès en temps réel à la sismicité enregistrée sur le territoire français. En outre, les observatoires volcaniques ont participé à plusieurs projets de recherche nationaux de l'ANR, ainsi qu'au projet européen de mise en réseau EUROVOLC ayant pour objectif de favoriser les synergies au sein de la communauté volcanologique relativement fragmentée.

The observatories have a strong collaboration with the IPGP Data Centre to disseminate volcanological and seismological data to the scientific community via national and international data centres (RESIF, FDSN-IRIS-DMC) and the VOLOBISIS data access portal. They are also working within the EPOS framework to harmonise data and meta-data standards at European level. In 2019, the observatories and the IPGP Data Centre worked together with RENASS-BCSF and prepared for the upcoming implementation of real-time access to seismicity recorded on French territory. Moreover, volcano observatories participated in several ANR national research projects and one European networking project (EUROVOLC) to foster synergies in the fragmented volcanological community.

Progress achieved in 2019 in the observational networks

Les quatre observatoires d'outre-mer exploitent un réseau géophysique central de 270 stations de télémétrie, dont 143 stations sismiques et 65 stations GNSS (Global Navigation Satellite System), ainsi que 14 capteurs géochimiques qui transmettent leurs données en temps réel ou quasi réel. Par ailleurs, en coopération avec le CNRS-INSU et l'Ifremer, entre 4 et 16 OBS ont été déployés régulièrement pour des périodes de 1 à 6 mois autour de Mayotte afin d'enregistrer la sismicité due à la crise sismo-volcanique en cours. Les 17 stations combinant tiltmètres, extensomètres et creepmeters fournissent des informations complémentaires sur la déformation des volcans, tandis que des stations météorologiques (12 sites) fournissent des paramètres environnementaux clés aux données volcanologiques. Des caméras thermiques et optiques (10 sites) surveillent la phénoménologie sur des stations permanentes ou par le biais de relevés par hélicoptère et par drone. En outre, deux marégraphes sont exploités en Guadeloupe (OVSG) dans le cadre du système d'alerte aux tsunamis des Caraïbes.

The four overseas observatories operate a core geophysical network of 270 telemetered stations including 143 seismic stations and 65 GNSS (Global Navigation Satellite System) stations, and 14 geochemical sensors which transmit their data in real or near real-time. In addition, in cooperation with CNRS-INSU and Ifremer, between 4 to 16 ocean-bottom seismometers (OBS) have been deployed regularly for periods of 1 to 6 months around Mayotte to record seismicity associated with the ongoing sismo-volcanic crisis. The 17 tiltmeters, extensometers and creepmeters stations provide complementary information about volcano deformation, whereas meteorological stations (12 sites) provide key environmental parameters to the volcanological data. Thermal and optical cameras (10 sites) monitor the phenomenology on permanent stations or through helicopter and drone surveys. Two tide-meters are also operated in Guadeloupe as part of the Caribbean Tsunami Warning System.

Globalement, les observatoires fournissent des données provenant de relevés de réitération et d'échantillonnage sur plus de 232 sites, essentiellement pour la déformation (196 sites) et la géochimie (36 sites). En tant que membre du consortium du Réseau accélérométrique permanent (RAP), les observatoires sont en charge de 44 stations à forte mobilité dans les Antilles. L'observatoire du Piton de la Fournaise (OVPF), en partenariat avec

Overall the observatories also provide data from re-iteration surveys and sampling at more than 232 sites essentially for deformation (196 sites) and geochemistry (36 sites). As a member of the consortium of the French accelerometric network (RAP), the observatories are in charge of 44 strong-motion stations in the West Indies. Extensive ground, airborne, and satellite-based networks for ground deformation and volcanic gas emissions are also operated by the Piton de la Fournaise observatory, in partnership with other regional and national research



d'autres institutions de recherche régionales et nationales de pointe, exploite également de vastes réseaux terrestres, aériens et satellitaires pour la déformation du sol et les émissions de gaz volcaniques. Dans les quatre observatoires, le même système d'acquisition de données sismiques dernier cri a été développé et installé, constitué d'une plateforme de clusters de virtualisation de dernière génération. Un système web intégré de surveillance, de gestion du réseau et de traitement et modélisation des données appelé WebObs est installé dans chaque observatoire. Un service web, VOLOBISIS (Centre de données IPGP) a été développé et est maintenant opérationnel pour les observatoires supervisés par l'IPGP.

Comme cela a déjà été fait il y a plusieurs années à La Réunion, l'OVSG et l'OVSM ont coopéré en 2019 avec RGP/Teria pour partager les sites géodésiques historiques sur lesquels Teria a installé ses équipements : 4 sites en Martinique et 8 en Guadeloupe, dont des sites importants tels que celui aux Saintes et les deux marégraphes à La Désirade et Deshaies, qui font partie du système d'alerte aux tsunamis dans les Caraïbes (UNESCO). Compte tenu de l'importance primordiale de maintenir à La Soufrière un système de surveillance du gaz en continu, télémétrique, haute résolution et en temps quasi-réel, l'observatoire a décidé de reconcevoir entièrement les stations MultiGAS, détruites en 2017 par l'ouragan Maria, pour

institutions expert. In all four observatories, a modern and similar seismic data acquisition system has been developed and installed with modernized virtualization cluster platforms. An integrated web-based system for monitoring, network management and data processing and modelling called WebObs is implemented in each observatory. A web service, VOLOBISIS (IPGP Data Center), was developed and is now operational for the IPGP supervised observatories.

As was done many years ago in La Réunion, the OVSG and the OVSM cooperated in 2019 with RGP/Teria to share geodetic historical sites on which Teria installed its equipment. These include 4 sites in Martinique and 8 in Guadeloupe including important sites in Les Saintes, and La Désirade and Deshaies tide gauges that are part of the Caribbean Tsunami Warning System (UNESCO). Given the paramount importance to maintain a continuous telemetered quasi-real time, high-resolution gas monitoring system at La Soufrière, the observatory decided to completely re-design the MultiGAS stations, destroyed in 2017 by hurricane Maria, to improve their resilience to the harsh environmental conditions of the summit of the volcano. The OVSG proceeded with a complete and systematic reassessment of field, analytical, and processing protocols for gases in order to quantify uncertainties, limitations, and errors. The improved extensive data series

améliorer leur résilience aux conditions environnementales difficiles du sommet. L'OVSG a ainsi procédé à une réévaluation complète et systématique des protocoles de terrain, d'analyse et de traitement des gaz afin de quantifier les incertitudes, les limites et les erreurs. L'amélioration des séries de données étendues ainsi que les mesures permanentes de la température ont permis une évaluation thermodynamique plus innovante de la signature géochimique hydrothermale et magmatique des fluides de La Soufrière. L'OVSG maintient une collaboration active avec l'Observatoire volcanique de Montserrat (MVO).

En Martinique, le réseau de détection sismique et acoustique des lahars de la rivière du Prêcheur a été modernisé pour assurer une meilleure caractérisation et différenciation des lahars et des écoulements hyper-concentrés déclenchés par l'effondrement récurrent de la falaise Samperre. Des sites supplémentaires ont été aménagés pour les relevés de répétition GNSS sur la Montagne Pelée. L'OVPF à La Réunion a poursuivi la préparation d'une extension du réseau sismique et GNSS afin d'améliorer la surveillance d'éventuelles éruptions sur les flancs latéraux du volcan, en dehors de l'Enclos Fouqué, qui pourraient menacer les zones habitées. Il a développé de nouveaux capteurs de gaz miniatures aéroportés par drone. L'OVPF a également poursuivi son solide partenariat avec l'OPGC-LMV (Université Clermont Auvergne) pour la surveillance radar par satellite de la déformation des volcans, ainsi que pour la modélisation de l'évolution spatio-temporelle du flux éruptif et de la propagation des coulées de lave actives pendant une éruption, afin de contribuer à la gestion de crise.

A Mayotte, le réseau de surveillance terrestre a été considérablement développé en 2019 par l'équipe du REVOSIMA avec l'installation de 5 stations sismiques et 4 stations GNSS dont celle située sur la minuscule île Grande Glorieuse, dans les îles Eparses située entre Mayotte et Madagascar, par l'OVPF. Une étude des sites de dégazage diffus du sol a été entreprise sur l'île de Petite-Terre, incluant des échantillonnages pour certains sites en vue de l'installation d'une station de surveillance en continu et en temps réel du flux de CO₂.



along with permanent temperature measurements has allowed for more innovative thermodynamic assessment of the hydrothermal and magmatic geochemical signature of fluids from La Soufrière. The OVSG maintains an active collaboration with Montserrat Volcanic Observatory (MVO).

In Martinique, the seismic and acoustic detection network of lahars in the Prêcheur river was modernized to ensure better characterization and differentiations of lahars and hyper-concentrated stream flows triggered by recurrent collapse of the Samperre cliff. Additional sites were set up for GNSS repetition surveys on Montagne Pelée. The observatory of Piton de la Fournaise (La Réunion) has continued preparation for an expansion of the seismic and GNSS network to better monitor potential lateral flank eruptions outside the Enclos Fouqué that could threaten populated areas. It developed new miniature airborne gas sensors for UAV applications. It pursued its strong partnership with the OPGC-LMV (Université Clermont Auvergne) on satellite radar monitoring of volcano deformation as well as on the modelling of the spatio-temporal evolution of eruptive flux and the propagation of active lava flows during eruption as a contribution to crisis response. The OVPF maintains an active collaboration with the Italian National Institute of Geophysics and Volcanology (INGV), the Hawaiian Volcano Observatory and the Earth Observatory of Singapore. In Mayotte, the terrestrial monitoring network was significantly expanded in 2019 by the REVOSIMA team with the installation of 5 seismic stations and 4 GNSS stations including, by the OVPF, the tiny island Grande Glorieuse in the Eparses islands located between Mayotte and Madagascar. A survey of diffuse soil degassing sites was undertaken on Petite-Terre Island and degassing sites sampled in preparation for the installation of a continuous real-time CO₂ flux monitoring station.

Activité sismique et volcanique Seismic and volcanic activity

Après une nette augmentation de l'activité de la Soufrière de Guadeloupe entre janvier et mai 2018, qui a atteint son plus haut niveau d'énergie sismique le 27 avril 2018 avec le plus grand séisme volcano-tectonique ressenti (M4.1) enregistré depuis l'éruption phréatique de 1976-1977, l'activité a diminué tout en restant à un niveau modéré, nécessitant une vigilance et une surveillance renforcées, ainsi que la restriction par la préfecture de l'accès aux zones les plus actives du volcan depuis le 14 janvier 2019. Des essais sismo-volcaniques de faible énergie et de faible profondeur ont commencé à être fréquemment enregistrés depuis août 2018, avec jusqu'à 30 essais documentés au 31 décembre 2019. Au total, l'OVSG a enregistré en 2019 plus de 5245 événements sismo-volcaniques. Au sommet, au cours de cette période, les fractures ont continué à s'ouvrir lentement et les anomalies thermiques se sont propagées, tandis que les flux de gaz fumerolien sont restés élevés. La déformation est limitée au dôme, s'étendant sur moins de 1 km de rayon avec des mouvements horizontaux de l'ordre de 3-7 mm ± 0,2/an et jusqu'à 10 mm ± 0,2/an sur le flanc sud du dôme. Les compositions de gaz dans les échantillons de fumerolles

After a marked increase in the unrest of La Soufrière of Guadeloupe between January and May 2018 that reached its highest seismic energy level on 27 April 2018, with the largest felt volcano-tectonic earthquake (M4.1) recorded since the 1976-1977 phreatic eruption, the activity decreased but remained at a moderate level requiring reinforced vigilance and monitoring, and the restriction by the Préfet since 14 January 2019, of access to the most active areas of La Soufrière. Low-energy shallow-depth volcanic seismic swarms began to be recorded frequently since August 2018 with up to 30 swarms documented up until 31 December 2019. All together in 2019 the OVSG recorded more than 5,245 volcanic seismic events. During this period, summit fractures have continued to open slowly, thermal anomalies extended further on the summit, and fumarole fluxes have remained elevated. Deformation is limited to the dome extending to less than 1 km radius with horizontal movements on the order of 3-7 mm ± 0,2/year and up to 10 mm ± 0,2/year on the southern flank of the dome. Gas compositions continue to reveal a magmatic signature in fumaroles samples but have decreased to levels prior the major unrest of April



continuent de révéler une signature magmatique, même si on note une diminution jusqu'à des niveaux antérieurs aux perturbations d'avril 2018. Cependant, elles montrent toujours les signes d'une circulation active de fluide hydrothermal dans la roche hôte, produisant des augmentations transitoires de pression et de température, conditions jusqu'à présent limitées par le système hydrothermal profond, sans atteindre le point critique de l'eau comme le 27 avril 2018. L'activité sismique aux Saintes (15 km au sud-est de La Soufrière), à proximité de la zone épicertrale du séisme de faille normale M_{6,3} du 21 novembre 2004, a progressé en 2019 avec 1070 séismes enregistrés dont plusieurs événements ressentis, tel que celui du 21 janvier 2019 (M_{4,1}) qui a été fortement ressenti localement.

En Martinique, l'observatoire a enregistré 107 séismes volcano-tectoniques de très faible énergie et de faible profondeur sur la Montagne Pelée, qui se sont produits lors de deux essaims principaux en avril-mai et novembre-décembre 2019. Typique de la Montagne Pelée, cette sismicité s'est déjà produite par le passé. Par ailleurs, au moins 63 signaux ont été enregistrés en lien avec les nombreux éboulements de la falaise Samperre, en amont de la rivière du Prêcheur. Une majorité de ces signaux était associée aux 42 événements de coulées

Après une nette augmentation de l'activité de la Soufrière de Guadeloupe entre janvier et mai 2018, qui a atteint son plus haut niveau d'énergie sismique le 27 avril 2018 avec le plus grand séisme volcano-tectonique ressenti (M_{4.1}) enregistré depuis l'éruption phréatique de 1976-1977, l'activité a diminué tout en restant à un niveau modéré, nécessitant une vigilance et une surveillance renforcées, ainsi que la restriction par la préfecture de l'accès aux zones les plus actives du volcan depuis le 14 janvier 2019. Des essaims sismo-volcaniques de faible énergie et de faible profondeur ont commencé à être fréquemment enregistrés depuis août 2018, avec jusqu'à 30 essaims documentés au 31 décembre 2019. Au total, l'OVSG a enregistré en 2019 plus de 5245 événements sismo-volcaniques. Au sommet, au cours de cette période, les fractures ont continué à s'ouvrir lentement et les anomalies thermiques se sont propagées, tandis que les flux de gaz fumerolien sont restés élevés. La déformation est limitée au dôme, s'étendant sur moins de 1 km de rayon avec des mouvements horizontaux de l'ordre de 3-7 mm ± 0,2/an et jusqu'à 10 mm ± 0,2/an sur le flanc sud du dôme. Les compositions de gaz dans les échantillons de fumerolles continuent de révéler une signature magmatique, même si on note une diminution jusqu'à des niveaux antérieurs aux perturbations d'avril 2018. Cependant, elles montrent toujours les signes d'une circulation active de fluide

2018. However, they continue to track evidence of efficient hydrothermal fluid circulation in the host-rock that produce transitory increases of pressure and temperature conditions that have remained so far buffered by the deep hydrothermal system without approaching the critical point of water like on 27 April 2018. Seismic activity in Les Saintes (15 km southeast of La Soufrière), in the vicinity of the epicentral zone of the 21 November 2004 M_{6,3} normal fault earthquake, remained elevated in 2019 and increased with 1,070 earthquakes recorded with several felt events including the largest M_{4,1} event of 21 January 2019 that was strongly felt locally.

In Martinique, the observatory recorded 107 volcano-tectonic earthquakes of very low energy and located at shallow depths on Montagne Pelée that occurred during two main swarms in April-May and November-December 2019. This seismicity is typical of Montagne Pelée and has already occurred in the past. In addition, at least 63 signals were recorded in relation to the numerous rockfalls from the Samperre cliff, at the headwaters of the Prêcheur river. These were often associated to the 42 signals of debris flows (lahars and hyperconcentrated stream-flows) that occurred in the Prêcheur River threatening the population near the river bank in the Prêcheur village. Evacuations were regularly ordered by authorities.

After a marked increase in the unrest of La Soufrière of Guadeloupe between January and May 2018 that reached its highest seismic energy level on 27 April 2018, with the largest felt volcano-tectonic earthquake (M_{4.1}) recorded since the 1976-1977 phreatic eruption, the activity decreased but remained at a moderate level requiring reinforced vigilance and monitoring, and the restriction by the Préfet since 14 January 2019, of access to the most active areas of La Soufrière. Low-energy shallow-depth volcanic seismic swarms began to be recorded frequently since August 2018 with up to 30 swarms documented up until 31 December 2019. All together in 2019 the OVSG recorded more than 5,245 volcanic seismic events. During this period, summit fractures have continued to open slowly, thermal anomalies extended further on the summit, and fumarole fluxes have remained elevated. Deformation is limited to the dome extending to less than 1 km radius with horizontal movements on the order of 3-7 mm ± 0,2/year and up to 10 mm ± 0,2/year on the southern flank of the dome. Gas compositions continue to reveal a magmatic signature in fumaroles samples but have decreased to levels prior the major unrest of April 2018. However, they continue to track evidence of efficient hydrothermal fluid circulation in the host-rock that produce transitory increases of pressure and temperature conditions that have remained so far buffered by



hydrothermal dans la roche hôte, produisant des augmentations transitoires de pression et de température, conditions jusqu'à présent limitées par le système hydrothermal profond, sans atteindre le point critique de l'eau comme le 27 avril 2018. L'activité sismique aux Saintes (15 km au sud-est de La Soufrière), à proximité de la zone épicertrale du séisme de faille normale M_{6,3} du 21 novembre 2004, a progressé en 2019 avec 1070 séismes enregistrés dont plusieurs événements ressentis, tel que celui du 21 janvier 2019 (M_{4,1}) qui a été fortement ressenti localement.

En Martinique, l'observatoire a enregistré 107 séismes volcano-tectoniques de très faible énergie et de faible profondeur sur la Montagne Pelée, qui se sont produits lors de deux essaims principaux en avril-mai et novembre-décembre 2019. Typique de la Montagne Pelée, cette sismicité s'est déjà produite par le passé. Par ailleurs, au moins 63 signaux ont été enregistrés en lien avec les nombreux éboulements de la falaise Samperre, en amont de la rivière du Prêcheur. Une majorité de ces signaux était associée aux 42 événements de coulées

the deep hydrothermal system without approaching the critical point of water like on 27 April 2018. Seismic activity in Les Saintes (15 km southeast of La Soufrière), in the vicinity of the epicentral zone of the 21 November 2004 M_{6,3} normal fault earthquake, remained elevated in 2019 and increased with 1,070 earthquakes recorded with several felt events including the largest M_{4,1} event of 21 January 2019 that was strongly felt locally.

In Martinique, the observatory recorded 107 volcano-tectonic earthquakes of very low energy and located at shallow depths on Montagne Pelée that occurred during two main swarms in April-May and November-December 2019. This seismicity is typical of Montagne Pelée and has already occurred in the past. In addition, at least 63 signals were recorded in relation to the numerous rockfalls from the Samperre cliff, at the headwaters of the Prêcheur river. These were often associated to the 42 signals of debris flows (lahars and hyperconcentrated stream-flows) that occurred in the Prêcheur River threatening the population near the river bank in the Prêcheur village. Evacuations were regularly ordered by authorities.



torrentielles (lahars et débits hyperconcentrés) qui se sont produits dans la rivière du Prêcheur, menaçant la population près des berges de la rivière, dans le village de Prêcheur. Des évacuations ont été régulièrement ordonnées par les autorités. Le système d'alerte conçu et entretenu par l'OVSM depuis 2001 a été endommagé et a dû être réparé à plusieurs reprises.

Cette année encore, le Piton de La Fournaise a été très actif avec cinq éruptions au total qui sont restées localisées à l'intérieur de la caldeira de l'Enclos-Fouqué. Un total de 28 jours d'éruption ayant entraîné 552 heures de travail supplémentaire pour les scientifiques en service. À l'échelle de l'île de la Réunion, hors Piton de la Fournaise, la plupart des 589 séismes locaux étaient situés sous le massif de la « Roche Écrite » au nord de l'île, près de la capitale Saint-Denis. Aucun n'a été ressenti en 2019. Par ailleurs, l'OVPF continue de collaborer étroitement avec l'Observatoire des volcans hawaïens à travers un programme d'échange, mais aussi avec l'Institut national italien de géophysique et de volcanologie (INGV), l'Observatoire de la Terre de Singapour et l'observatoire des Comores. Les membres de l'observatoire organisent des réunions régulières et travaillent main dans la main avec leurs partenaires historiques.

The alert system designed and maintained by the observatory of Martinique since 2001 was damaged and repaired several times.

The year 2019 was once again very active in the Piton de La Fournaise with five eruptions that remained located inside the Enclos-Fouqué caldera. A total of 28 days of eruption in 2019 resulted in 552 hours of extra-work for scientists on-duty call. At the scale of La Réunion Island, excluding the Piton de la Fournaise, most of the 589 local earthquakes were located under the "Roche Écrite" massif to the North of the Island near the capital city of Saint-Denis, none were felt in 2019. In addition, OVPF continues to work closely with the Hawaiian Volcano Observatory through an exchange programme, as well as with the Italian National Institute of Geophysics and Volcanology (INGV), the Singapore Earth Observatory and the Comoros Observatory. Thus, scientists and engineers have organised regular meetings and collaborative work with their historical partners.

L'OVSG et l'OVSM ont identifié respectivement 1895 et 1133 événements tectoniques régionaux dans leur périmètre des Antilles françaises, dont 1073 dans la région des Saintes. Au total, 13 tremblements de terre ont été ressentis en Guadeloupe et en Martinique, déclenchant des bulletins spéciaux envoyés aux autorités locales. Le séisme M5,1 du 25 juillet 2019 a été largement ressenti en Guadeloupe. L'OVPF a quant à lui enregistré 10103 événements sismiques, dont 9304 liés à l'activité du Piton de la Fournaise, envoyé 69 bulletins d'activité exceptionnels, 23 VONAs (Volcano Observatory Notice for Aviation) émis au VAAC (Volcanic Ash Advisory Center) et 31 alertes volcaniques aux autorités locales. A Mayotte, le REVOSIMA a enregistré au moins 20 séismes ressentis de magnitude M >3.

L'observatoire historique de la Martinique a été construit en 1932-1935. Le nouveau bâtiment, fourni par la Collectivité Territoriale de la Martinique (CTM), a été livré au début de l'année 2019. L'IPGP profite de cette occasion unique pour y installer des équipements scientifiques de pointe et pour promouvoir une nouvelle plate-forme caribéenne de recherche et de surveillance en sciences de la Terre en renforçant la collaboration avec ses partenaires caribéens (CENAI, BME Haïti, UWI-SRC Trinidad, PRSN, KNMI) et en développant de nouveaux instruments marins dans le cadre du projet PREST INTERREG.

The OVSG and OVSM observatories identified respectively 1,895 and 1,133 regional tectonic events in their area of interest in the French West Indies, including 1,073 for the Les Saintes region. A total of 13 earthquakes were respectively felt in Guadeloupe and Martinique, triggering special bulletins that were sent to local authorities. The M5,1 earthquake on 25 July 2019 was largely felt in Guadeloupe. The OVPF observatory has recorded 10,103 seismic events including 9,304 linked to the activity of the Piton de la Fournaise volcano, sent 69 exceptional detailed activity bulletins, 23 VONAs (Volcano Observatory Notice for Aviation) issued to VAAC (Volcanic Ash Advisory Center) and 31 volcano-related alerts to the local authorities. In Mayotte, the REVOSIMA recorded at least 20 felt earthquakes of magnitude M >3.

The historical volcano observatory of la Martinique was built in 1932-1935. The new building, provided by the territorial council of Martinique (CTM) was delivered in early 2019. The IPGP is taking this unique opportunity to install state-of-the-art laboratory equipment in the new building and to promote and foster a new Caribbean research and monitoring platform in Earth Sciences by reinforcing collaboration with Caribbean partners (CENAI, BME Haiti, UWI-SRC Trinidad, PRSN, KNMI) and developing new marine instrumentation within the PREST INTERREG project.



Le centre de données de l'IPGP (CDIPGP) a pour mission principale la gestion et la mise à disposition pour la communauté scientifique des données d'observation de l'IPGP. Il est responsable de l'archivage de ces données, leur stockage à long terme (protection renforcée) ainsi que leur diffusion dans des formats et interfaces standards. Il est également en charge du transfert de ces données à des services externes tels que le Réseau sismologique et géodésique français (RESIF), l'International Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN) et le Planetary Data System (PDS) de la NASA. En outre, il est responsable de la déclaration des DOI (Digital Object Identifier) associés aux réseaux de données IPGP.

Le CDIPGP gère les données (sismologiques, GNSS, volcanologiques) de 5 réseaux permanents d'observatoires : G : GEOSCOPE ; GL : volcanologie et sismologie de la Guadeloupe ; MQ : volcanologie et sismologie de la Martinique ; PF : volcanologie de la Réunion (Piton de la Fournaise) ; WI : réseau sismologique français des Antilles (West Indies). Il gère également les données de l'instrument SEIS de la mission martienne InSight.

L'équipe du CDIPGP, qui fait partie du réseau d'ingénieurs de RESIF, se compose de 4 personnes (un chercheur et 3 ingénieurs, 3.25 ETPT) qui travaillent en étroite collaboration avec les autres observatoires de l'IPGP, des programmes de recherche tels qu'InSight, la plateforme S-CAPAD et le service informatique de l'IPGP. Par ailleurs, le CDIPGP a bénéficié en 2019 d'un poste d'ingénieur d'études au concours externe du CNRS qui a été pourvu, avec une prise de fonction au 1^{er} décembre 2019.

Réalisations marquantes en 2019

Achievements in 2019

> **Publication des données SEIS au CDIPGP** et transfert de celles-ci au PDS ainsi qu'au centre international de données IRIS-DMC.

> **Réalisation de la rubrique Science sur le site web de SEIS** pour l'accès public aux données et la publication du premier catalogue sismique de Mars (Fig. 1). Déclaration du DOI SEIS : 10.18715/SEIS.INSIGHT.XB_2016.

The main mission of the IPGP Data Center (IPGP-DC) is to manage and to distribute to the scientific community observational data from the IPGP. It is responsible for data archiving, long-term curation (enhanced protection) and data distribution through standard formats and interfaces. It is also in charge of relaying data to external services, as the French seismological and geodetic network (RESIF), the Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN) and the NASA Planetary Data System (PDS). IPGP-DC is also responsible for declaring the Digital Object Identifiers (DOIs) associated with IPGP scientific networks. IPGP-DC manages the data (seismological, GNSS, volcanological) of 5 permanent networks of observatories: G: GEOSCOPE; GL: volcanology and seismology of Guadeloupe; MQ: volcanology and seismology of Martinique; PF: volcanology of Reunion Island (Piton de la Fournaise); WI: French West Indies seismological network. IPGP-DC also manages the data of the SEIS instrument of the Martian InSight mission.

The IPGP-DC team, which is part of the RESIF engineering network, consists of 4 people (one researcher and 3 engineers, 3.25 FTEs), who work in close collaboration with the IPGP observatories, with research programs such as InSight, the S-CAPAD platform and the IPGP IT service. In 2019, IPGP-DC got a "ingénieur d'études" permanent position via the CNRS external competition. The position was filled, and the recruited engineer took office on December 1, 2019.

> **Release of SEIS data at the IPGP Data Center** and transfer of this data to PDS and to IRIS-DMC international data center.

> **Creation of a new Science section of the SEIS web site for public access to SEIS data** and the release of the first seismic catalog of Mars (Fig. 1). Creation of a DOI for SEIS data: 10.18715/SEIS.INSIGHT.XB_2016.

> **Mise en production de l'accès aux données volcanologiques** (ex. : gaz, inclinométrie, flux de chaleur, magnétisme, météo) via les web services FDSN (<http://ws.ipgp.fr/fdsnws>), le portail VOLOBSIS (Fig.2) et le TCS VOLCANO OBSERVATIONS d'EPOS.

> **Mise à disposition du web service « volcano reports »** pour les rapports d'activité volcanique (<http://ws.ipgp.fr/volcano-reports>). Collaboration avec les observatoires volcanologiques dans le cadre d'EPOS, qui a financé un ingénieur contractuel.

> **Test d'intégration et préproduction des systèmes d'information pour l'accès aux données GNSS de l'IPGP**, via deux interfaces : webservices GSAC et GLASS. Le CDIPGP est le nœud GLASS de données GNSS dans EPOS.

> **Participation au développement d'un outil de contrôle de qualité de données sismologiques.** Collaboration avec les observatoires volcanologiques et GEOSCOPE dans le cadre d'un projet RESIF, qui a financé un ingénieur contractuel. Première version publiée sur <https://github.com/IPGP/morumotto>.

> **Participation à la rédaction du projet CEDRE** (Vers la certification des répertoires français de données en Terre Solide) dans le cadre de l'appel d'offre « Science ouverte de l'ANR ». Projet financé d'une durée de deux ans.

> **Participation à l'écriture des spécifications pour le développement d'un outil d'édition des métadonnées** au format stationXML (financé par RESIF).

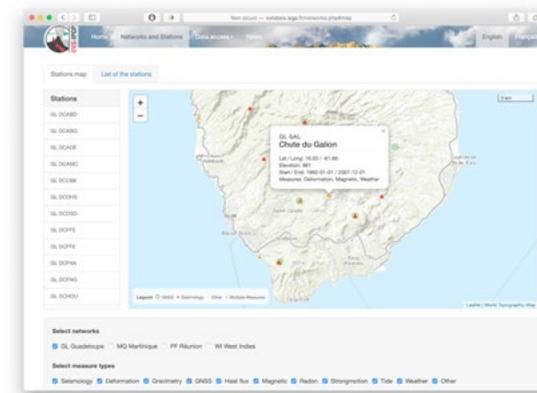


Figure 2 : Accès aux données volcanologiques (ex. déformation, magnétisme, météo) via le portail web VOLOBSIS : volobsis.ipgp.fr.
Figure 2 : Access to volcanological data (e.g. deformation, magnetic, weather) through the web portal VOLOBSIS: volobsis.ipgp.fr.



Figure 1 : Page Science du portail SEIS/InSight : <https://www.seis-insight.eu/fr/science> développée et hébergée par le centre de données IPGP.
Science section of the SEIS/InSight web portal: <https://www.seis-insight.eu/fr/science> developed and hosted by IPGP Data Center.

> **Release of new services to access volcanological data** (e.g. gas, tiltmeter, heat flux, magnetic, weather) through FDSN web services (<http://ws.ipgp.fr/fdsnws>), VOLOBSIS web portal (fig. 2) and EPOS TCS VOLCANO OBSERVATIONS.

> **Release of "volcano reports" web service** (<http://ws.ipgp.fr/volcano-reports>). Collaboration with the Volcanological Observatories within the framework of EPOS, which financed a contractual engineer.

> **Integration test and pre-production of information systems for access to IPGP GNSS data**, via two interfaces: GSAC et GLASS webservices. IPGP-DC is the GLASS node for GNSS data in EPOS.

> **Participation in the development of a quality control tool for seismological data.** Collaboration with the Volcanological Observatories and GEOSCOPE within the framework of a RESIF project, which financed a contractual engineer. First version published on <https://github.com/IPGPmorumotto>.

> **Participation in the drafting of the CEDRE project** (Towards the certification of French repertoires of data in Solid Earth) within the framework of the call for proposals "Open Science" of the ANR. Two-year funded project.

> **Participation in writing specifications for the development of a metadata editing tool** in stationXML format (funded by RESIF).

Le pôle national ForM@Ter a pour objectifs de faciliter l'accès aux données spatiales, in-situ et d'expérimentations du domaine Terre solide et de contribuer à la création de produits et de services à partir de celles-ci (<https://www.poleterresolide.fr>). S'inscrivant dans les paysages national et européen, il est une composante de l'infrastructure de recherche nationale Data Terra dédiée aux données sur l'ensemble du système Terre (<https://www.data-terra.org>). ForM@Ter comporte une structure opérationnelle basée à l'IPGP au sein du département des observatoires, intitulée Centre de Coordination et de Diffusion (CCD). Il fédère des centres de données et de services (CDS) ainsi que des centres d'expertise scientifique (CES) existants en France.

Réalisations marquantes en 2019

Achievements in 2019

> Accès aux données du domaine Terre solide

Finalisation du premier prototype de métacatalogue permettant une recherche géographique, temporelle ou par CDS : prévisualisation et téléchargement des données et métadonnées (en fonction de ce qui est permis par les CDS concernés). Cette première version sera ouverte sur le portail au deuxième semestre 2020.

> Mise en place de services de calcul

• Traitements à partir de données radar Sentinel-1

- Service de calcul à la demande de déformation du sol à partir de données radar : un prototype construit avec une équipe d'ISTerre et des chercheurs de l'IPGP a été finalisé début 2019 puis une collaboration avec le CNES a débuté pour ouvrir un service opérationnel en 2020. Ce service est une contribution à l'infrastructure européenne EPOS.
- Service de calcul systématique : ce second service également en cours de développement concerne le calcul systématique de séries d'interferogrammes sur de grandes zones géographiques. Les premiers résultats sur le Tibet sont accessibles dans le métacatalogue de ForM@Ter (accès limité pour le moment).

The objectives of the data and services hub ForM@Ter is to provide an easy access to Solid Earth satellite, in-situ and experimental data as to develop products and services based on those (<https://www.poleterresolide.fr>). Part of the European and international landscapes, ForM@Ter is one of the components of the French research Infrastructure Data Terra dedicated to data and services for the entire Earth System (<https://www.data-terra.org>).

ForM@Ter is composed of an operational unit called Coordination and Diffusion Centre (CDC) based at the IPGP within the Observatory Department. It federates existing French Data and Services Centers (DSC) and Scientific Expertise Centers (CSE).

> Solid Earth Data access

Finalisation of the first prototype of a meta-catalogue allowing a geographical, timely or among DSC research: data and metadata preview and downloading (depending on what is allowed by the DSC concerned). This first version will be available by the end of 2020.

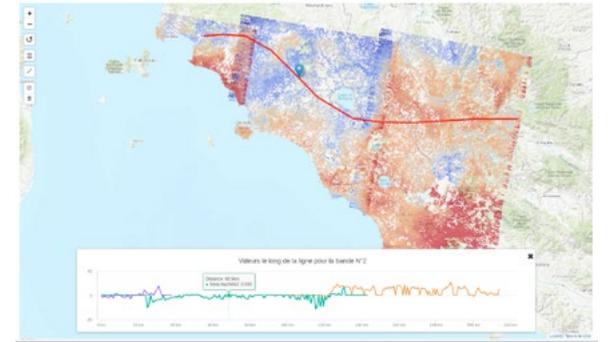
> Setting up processing services

• Radar Sentinel-1 data treatments

- On-demand ground deformation processing service using radar data: a prototype built with a team of ISTerre and IPGP researchers was finalized in early 2019 and then a collaboration with the CNES has begun to open an operational service in 2020. This service is a contribution to the European EPOS infrastructure.
- Systematic processing service: this second service, also under development, provides a systematic processing of series of interferograms over large geographical areas. The first results on Tibet are available in the ForM@Ter meta-catalogue (limited access at the moment).

• Traitements à partir de données optiques

- Service à la demande de corrélation d'images optiques : une collaboration a débuté fin 2019 avec A2S (Strasbourg) et l'équipe de tectonique de l'IPGP afin de mettre à disposition un service basé sur le logiciel MicMac développé initialement par l'IGN. Le service, adapté aux besoins de la communauté experte et non experte du domaine, sera une autre contribution à l'infrastructure européenne EPOS.
- Service de production de Modèles Numériques de Surface (MNS) en cours de développement par les pôles ForM@Ter et Théia (Surface Continentale) à partir d'un service proposé par A2S.



Outils de visualisation des produits du service de calcul à la demande GDM-SAR
 GDM-SAR on-demand product visualization tools

> Autres projets en cours

- Projets européens : après avoir participé à la phase d'implémentation d'EPOS, ForM@Ter participe désormais à EPOS Sustainability Phase (SP). Il est également impliqué via Data Terra dans plusieurs projets européens ayant débuté fin 2019 (GAIA, EOSC Pillar...).
- National : ForM@Ter, en collaboration avec RESIF et EPOS-France, a répondu à l'appel ANR Flash « Science ouverte : pratiques de recherche et données ouvertes » avec le projet CEDRE (towards Certification of solid Earth Data REpositories in France). Celui-ci vise à promouvoir les bonnes pratiques de data management d'une manière durable dans une démarche de données « FAIR » (Faciles à trouver, Accessibles, Interopérables et Réutilisables). Pour l'IPGP, le centre de données et le BCMT sont parties prenantes.
- ForM@Ter, en collaboration avec les autres pôles de Data Terra, met en place un entrepôt de données pour l'hébergement des jeux liés aux publications dans le cadre de « Science ouverte », ainsi que pour les données orphelines (non prises en charge par les centres de données existantes).
- ForM@Ter est impliqué dans tous les groupes de travail techniques dans le cadre de l'IR Data Terra : Data Management Plan, licences, certification, authentification...

• Processing based on optical data

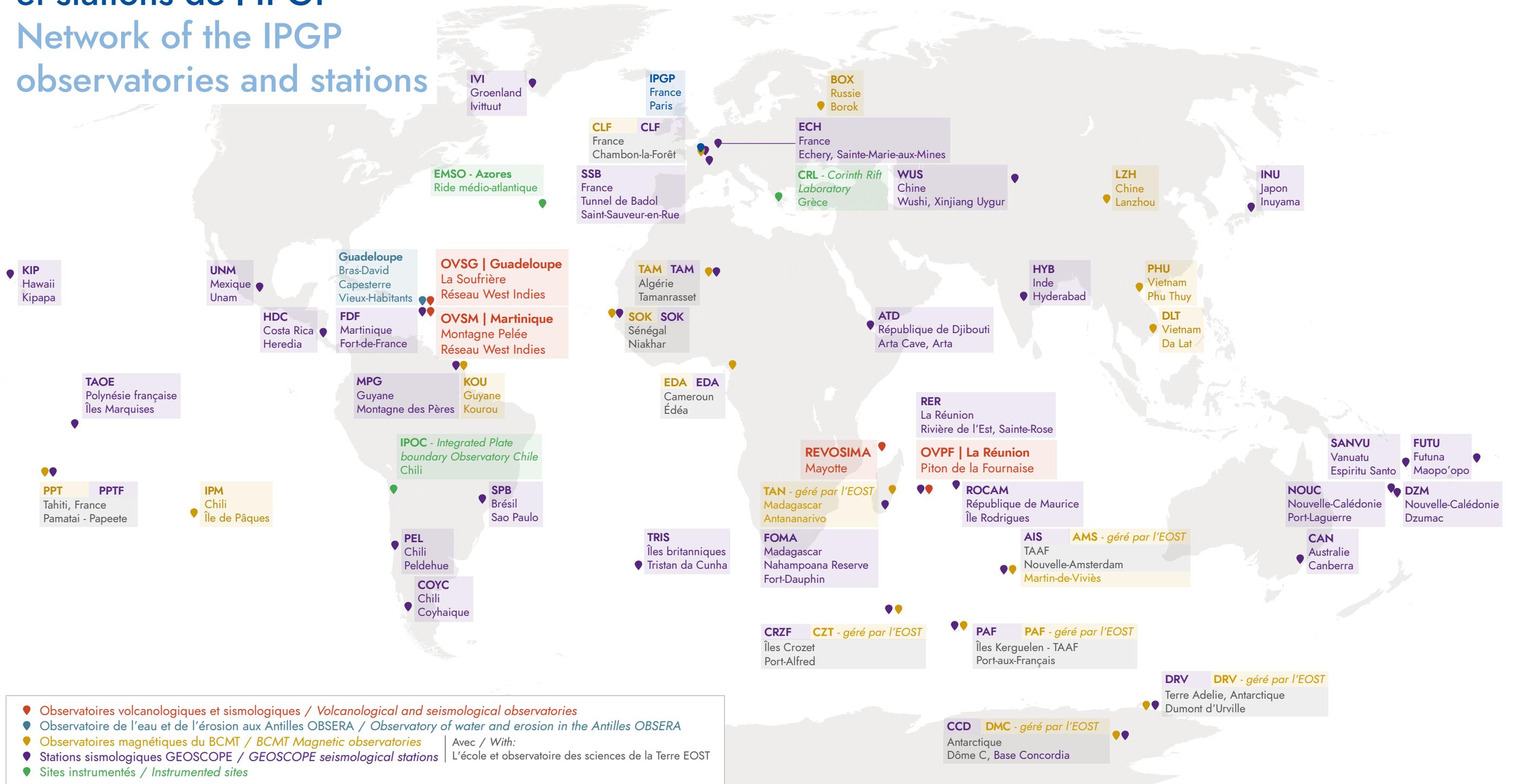
- Optical images correlation service: a collaboration started in 2019 with A2S (Strasbourg) and the Tectonic team of the IPGP to provide a service based on the MicMac software originally developed by the IGN. This service, adapted to the needs of experts and non-experts community, will be another contribution to the European infrastructure EPOS.
- A processing service dedicated to the production of Digital Surface Models (MNS) is being developed by the ForM@Ter and Theia (Continental Surfaces) hubs from a service offered by A2S.

> Other projects in progress

- European projects: after having been involved in the EPOS implementation phase, ForM@Ter is now involved in the EPOS Sustainability Phase (SP). It is also involved via Data Terra in several European projects that started at the end of 2019 (GAIA, EOSC Pillar...).
- National: ForM@Ter, in collaboration with RESIF and EPOS-France, responded to the ANR Flash call "Open Science: Research Practices and Open Data" with the CEDRE project (towards Certification of solid Earth Data REpositories in France). Its aim is to promote good practices of data management in a sustainable and "FAIR" (Findable, Accessible, Interoperable and Reusable) approaches. For the IPGP, the data center and the BCMT are involved.
- ForM@Ter, in collaboration with other Data Terra hubs, is setting up a data repository for hosting papers-related data sets in the framework of the "Open Science" as well as orphan data (not supported by existing data centers).
- ForM@Ter is involved in all technical working groups as part of the IR Data Terra: Data Management Plan, Licenses, Certification, Authentication..

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

INSIGHT - Sismomètre SEIS
Plaine d'Elysium
Planète Mars





Enseignement Teaching

Se former à l'IPGP dès le premier cycle Studying at IPGP from an undergraduate level

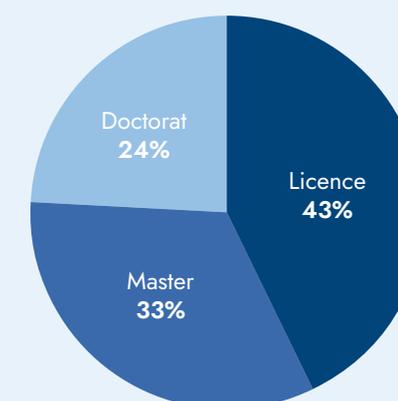
Depuis la création d'Université de Paris, l'IPGP est en charge de la formation en licence en sciences de la Terre et de l'environnement (géré auparavant par l'université Paris Diderot), au travers de son département de la formation et des études doctorales (DFED).

D'une durée de trois ans, la licence s'organise autour d'un tronc commun comprenant les fondamentaux en mathématiques, physique, chimie et géosciences. À cela s'ajoutent des options suivant le parcours choisi, voire un autre tronc commun pour les doubles diplômes.

Since the creation of Université de Paris, the IPGP has been in charge of the Bachelor's degree in Earth and Environmental Sciences (previously managed by the Université Paris-Diderot), through its Department of Education and Doctoral Studies (DFED).

The three-year degree is organised around a common core including fundamentals in mathematics, physics, chemistry and geosciences. In addition, there are options depending on the course chosen, and even another common core for double degrees.

405 étudiants à l'IPGP en 2019 - 2020 students at IPGP in 2019 - 2020





Trois formations seront ainsi disponibles à la rentrée 2020 :

> **La licence ST (Sciences de la Terre)** comportant deux parcours : un parcours Terre, tourné vers les géosciences fondamentales et un parcours Environnement, tourné vers les sciences de l'environnement et notamment leur dimension sociétale et appliquée. Cette licence compte aujourd'hui une centaine d'étudiants répartis sur les trois années.

> **La double licence ASTER (Asie orientale, monde arabe et sciences de la Terre)** aboutissant à l'obtention d'une licence ST et d'une licence LLCER en arabe, chinois ou japonais. Cette formation, qui a ouvert ses portes à la rentrée 2014, compte aujourd'hui une quinzaine d'étudiants se répartissant essentiellement en chinois et en japonais. Elle est construite en partenariat avec l'UFR Langues et civilisation de l'Asie orientale (LCAO) de la Faculté Sociétés et Humanités d'Université de Paris et l'INALCO.

Three training programmes will thus be available at the start of the 2020 school year:

> **The ST (Earth Science) degree**, which includes two courses: an Earth course, focused on fundamental geosciences, and an Environment course, focused on environmental sciences and in particular their societal and applied dimension. This Bachelor's degree currently has around a hundred students over the three years.

> **The ASTER dual degree (East Asia, Arab World and Earth Sciences)**, which leads to an Earth Science degree and a LLCER degree in Arabic, Chinese or Japanese. This course, which opened its doors at the start of the 2014 academic year, now has about fifteen students, mainly in Chinese and Japanese. It is built in partnership with the UFR East Asia Languages and Civilisation (LCAO) of the Faculty of Societies and Humanities of Université de Paris and INALCO.

> **Le Bachelor of Arts and Sciences de Sciences-Po** qui permet l'obtention du Bachelor de Sciences Po et de la licence ST. Cette formation, qui ouvrira à la rentrée 2020 et devrait accueillir une vingtaine d'étudiants, a pour objectif de former nos futurs décideurs aux enjeux contemporains en géosciences (changements climatiques, risques telluriques, gestion durable des ressources géologiques, échelles de temps des processus). Son originalité repose sur la création d'enseignements intégrés, combinant sciences et sciences sociales. Sa création conduira à l'ouverture dans trois ans d'un nouveau parcours de licence : Géosciences et politique.

À ces formations fondamentales s'ajoutent deux licences professionnelles en alternance, dont le but est de former des techniciens supérieurs dans la gestion et le traitement des déchets (GTD) et dans l'utilisation des méthodes d'exploration en géophysique appliquée (MEGA). En 2019 - 2020 ce sont ainsi 25 % des étudiants en L3 qui suivent ces formations importantes.

> **The Bachelor of Arts and Sciences with Sciences-Po (Paris Institute of Political Studies)**, which results in a Bachelor's degree from Sciences-Po and the Earth Science degree. This course, which will open at the start of the 2020 academic year and should welcome around twenty students, aims to train our future decision-makers in contemporary geosciences issues (climate change, telluric risks, sustainable management of geological resources, process time scales). Its uniqueness is based on the creation of integrated courses combining science and social sciences. Its creation will lead to the opening in three years' time of a new degree course: Geoscience and Politics.

In addition to these fundamental training courses, there are also two professional undergraduate degrees in an alternating apprenticeship format, the aim of which is to train senior technicians in waste management and treatment (GTD) and in the use of exploration methods in applied geophysics (MEGA). In 2019 - 2020, 25% of L3 students will be taking these important courses.

	1 ^{ère} année 1 st year	2 ^e année 2 nd year	3 ^e année 3 rd year	Inscriptions Enrollment
Licence sciences de la Terre Bachelor's degree in Earth Sciences	Terre - Environnement Earth - Environment	Terre - Environnement Earth - Environment	Terre Earth Environnement Environment Géosciences et politique ouverture en 2023 Geosciences and Policy opening 2023	130
Double licence Dual Bachelor's degree	ASTER ASTER	Terre et environnement Earth and Environment Langues et civilisations (arabe, chinois, japonais) Language and Civilisation (Arabic, Chinese, Japanese)		31
Licence + "Bachelor" Bachelor's degree + "Bachelor"	Politiques de la Terre Earth Policies	Terre et environnement Earth and Environment SciencesPo "Bachelor" en arts et sciences SciencesPo "Bachelor" of Arts & Sciences		
Licences professionnelles (alternance) Professional "Bachelor's degree" (sandwich courses)			GTD Gestion des déchets GTD Waste Management MEGA Géophysique d'exploration MEGA Exploration Geophysics	11 3

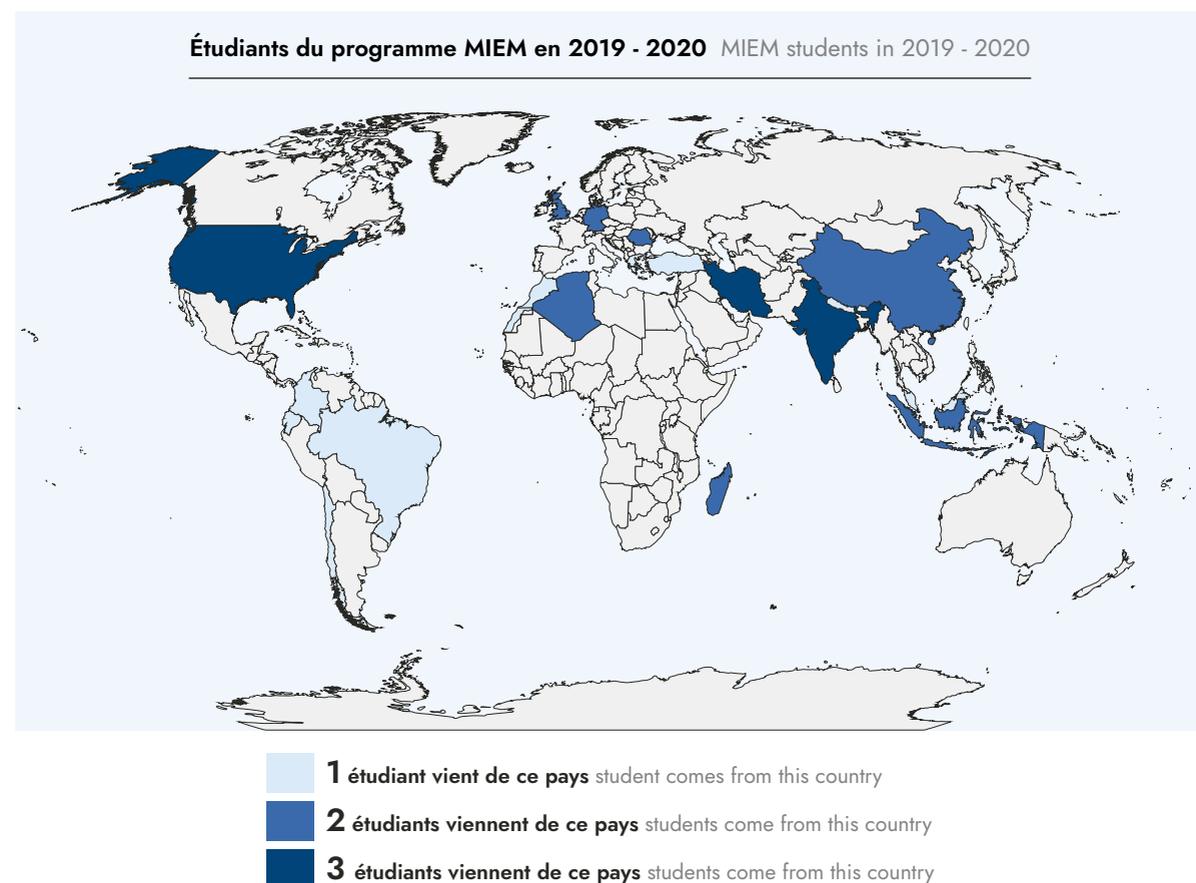
S'ouvrir sur le monde Opening up to the world

L'IPGP, après avoir créé plusieurs parcours en anglais (« Fundamentals of Remote Sensing », « International Master in Solid Earth Sciences »...) poursuit sa politique d'ouverture au travers de financements issus de l'IDEX d'Université de Paris, auxquels s'ajoutent des financements propres du DFED. Cette politique s'articule à la fois autour du recrutement d'étudiants étrangers au sein du master Sciences de la Terre et des Planètes, Environnement (STPE) et du soutien aux étudiants souhaitant effectuer des stages de M1 ou M2 à l'étranger.

Depuis 2014-2015, ce sont ainsi 39 bourses d'études qui ont été attribuées à des étudiants provenant de 20 pays différents et 16 bourses de stages à des étudiants de master, dont six en 2019-2020.

The IPGP, after having created several courses in English ("Fundamentals of Remote Sensing", "International Master in Solid Earth Sciences", etc.) is pursuing its policy of openness through funding from Université de Paris IDEX, in addition to its own funding from the DFED. This policy revolves around both the recruitment of foreign students within the Master's degree in Earth, Planetary and Environmental Sciences (STPE) and support for students wishing to do first- or second-year Master's degree internships abroad.

Since the 2014-2015 academic year, 39 scholarships have been awarded to students from 20 different countries, and 16 internship scholarships to Master's students, including six in 2019-2020.



Études doctorales Doctoral studies

Le service des études doctorales (SED) de l'IPGP pilote et coordonne l'ensemble des activités relatives au doctorat au sein de l'établissement et de l'UMR 7154, en relation étroite avec l'école doctorale STEP'UP (ED 560). Il assure l'accueil des doctorants et la gestion de leur vie professionnelle au sein de l'institut, de leur inscription à la délivrance de leur diplôme. Il participe également à l'animation du Collège des études doctorales d'Université de Paris, afin de maintenir une interaction permanente entre toutes les écoles doctorales et de mener des politiques de coordination et d'harmonisation des procédures administratives. L'IPGP participe ainsi à l'établissement de critères de répartition des moyens, au développement de programmes de formation, à l'amélioration de la réussite des doctorants ainsi qu'à la reconnaissance des écoles doctorales et du diplôme qu'elles délivrent.

Le service des études doctorales permet aux étudiants d'acquérir une formation d'excellence, en s'appuyant notamment sur les liens privilégiés et permanents établis entre l'ED STEP'UP et les chercheurs de l'IPGP. Ces derniers participent non seulement aux comités de suivi des thèses et aux entretiens pédagogiques de réinscription, mais aussi aux comités de sélection, renforçant ainsi la cohérence entre la politique scientifique de l'établissement et la sélection des futurs doctorants.

L'institut de physique du globe de Paris compte en 2019 une centaine de doctorants, dont plus d'un tiers en provenance de pays étrangers. Le service des études doctorales assure les démarches administratives liées à l'obtention des visas et des permis de séjour. En outre, il apporte son soutien chaque année à l'organisation du congrès des doctorants, permettant aux étudiants de l'ED STEP'UP de présenter les avancées de leurs recherches et d'échanger avec des collègues de tous horizons ainsi qu'avec des chercheurs renommés en géosciences. Indépendamment, le SED propose aussi, sous forme d'appel à projets, une aide à la mobilité internationale en garantissant un soutien financier pour le développement de nouvelles collaborations avec des équipes de recherche du monde entier. Plus d'une quinzaine de doctorants en sont lauréats tous les ans, leur permettant de développer leur réseau professionnel en dehors des circuits traditionnels. Le SED soutient également l'association des doctorants (HEKLA) ainsi que le réseau d'alumni de l'IPGP (anciens diplômés).

The Doctoral Studies Department (DSD) manages and coordinates all doctoral activities within the IPGP and its Joint Research Unit (UMR 7154). Its main mission is to welcome PhD candidates and manage their professional life within the institute, from registration to the award of the diploma. For this purpose, it works closely with the STEP'UP Doctoral School (STEP'UP). The DSD is also actively involved in the animation of the association of DSD of Université de Paris in order to maintain a permanent interaction between all doctoral schools in order to maintain a permanent interaction between all the doctoral schools and to lead policies of coordination and harmonization of administrative procedures. The IPGP thus participates in the establishment of criteria for the allocation of resources, the development of training programmes, the improvement of the success of PhD candidates and the recognition of doctoral schools and the diploma they deliver.

The DSD is part of the daily life of PhD candidates by giving them access to all the resources of the IPGP, which will enable them to acquire and maintain a record of excellence in research and by research. These efforts take advantage on the strong and permanent links between STEP'UP and the IPGP members. The latter participate not only in PhD monitoring committees and re-enrolment interviews, but also in selection committees, thus reinforcing the coherence between the institution's scientific policy and the selection of future PhD candidates. It also works to promote PhD activities and the rapid integration of young researchers into their host scientific teams.

In 2019, the Institut de physique du globe de Paris has about a hundred PhD candidates, more than a third of whom come from foreign countries. As soon as STEP'UP has selected the future PhD candidates, the DSD ensures the administrative procedures related to obtaining visas and residence permits. Every year, the DSD supports the organization of the PhD candidates' Congress, which enables PhD candidates from STEP'UP to present the evolution of their research and interact with European colleagues and renowned geoscientists. Independently, the DSD also offers, in the form of a call for projects, International Mobility Grants to provide financial support for the development of new collaborations with research teams around the world. More than 15 PhD candidates are awarded every year and can thus develop their own scientific networks outside the traditional channels of publications and international congresses. The Doctoral Studies Department also supports the HEKLA PhD candidates' association and the Alumni network, which includes all former the IPGP post-graduates.

Chiffres clés Key figures



24
thèses soutenues en 2019
PhDs defended in 2019



1
thèse en partenariat industriel
PhD in industrial partnership



50/50
Parité femmes-hommes
au niveau doctoral
Gender equality among PhDs



nouvelles thèses démarrées en 2019 dont :

11 doctorants étrangers
(dont 10 non-européens) et **15** français
10 doctorants issus de masters IPGP et
16 hors formation IPGP
13 femmes et **13** hommes

new PhDs started in 2019 including:

11 foreign PhD candidates
(including 10 non-European) and **15** French
10 PhD candidates from IPGP masters
courses and **16** outside IPGP training
13 women and **13** men



26

financements de thèses différents dont :

9 + 6 x 0.5 (=12) du MESRI - Ministère de l'enseignement supérieur,
de la recherche et de l'innovation
1 CIFFRE - Convention industrielle de formation par la recherche
3 x 0.5 (=1.5) du CNES - Centre national d'études spatiales
2 + 2 x 0.5 (=3) de l'ANR - Agence nationale de la recherche
0.5 de l'ERC - Conseil européen de la recherche
1 AMN - Allocation Moniteur Normalien
1 de l'IGN - Institut national de l'information géographique et forestière
2 du CSC - China Scholarship Council
0.5 de l'ONERA - Office national d'études et de recherches aérospatiales
1 de la Région Île-de-France (DIM ACAV)
0.5 de l'université Paris Diderot (désormais Université de Paris)
1 de l'université de Turin, Italie
1 du Ministère des Affaires étrangères et de la Japanese Science and
Technology Agency

different PhD fundings including:

9 + 6 x 0.5 (=12) contracts from Ministry of Higher Education, Research
and Innovation
1 CIFFRE - Industrial agreement for education through research
3 x 0.5 (=1.5) of the CNES - National Centre for Space Studies
2 + 2 x 0.5 (=3) from the ANR - National Research Agency
0.5 of the ERC - European Research Council
1 AMN - "Normalien" Monitor Grant
1 of the IGN - Institut national de l'information géographique et forestière
2 of the CSC - China Scholarship Council
0.5 of the ONERA - French Aerospace Lab
1 of the Île-de-France Region (DIM ACAV)
0.5 of the Université Paris Diderot (now Université de Paris)
1 of the Turin University, Italy
1 of the Ministry of Foreign Affairs and of the Japanese Science and
Technology Agency

CONGRÈS DES DOCTORANTS

MARCH 25TH
TO 29TH, 2019

26TH EDITION



Focus

Congrès des doctorants PhD candidate Congress

Cette 26^e édition du congrès des doctorants (CDD) était, pour la première fois depuis sa création, organisée et animée par des étudiants de 1^{ère} année appartenant aux deux composantes de l'école doctorale STEP'UP (« Sciences de la Terre et de l'Environnement » et « Physique de l'Univers »). Les doctorants de l'IPGP, profitant de leurs liens étroits avec ceux de l'ENS, ont accueilli dans leurs murs leurs collègues des laboratoires APC, AIM, LPNHE et LPTHE, ainsi qu'une dizaine de doctorants européens spécialement invités. Avec plus de 176 participants sur cinq jours, le CDD a franchi une nouvelle étape et devient, au niveau du doctorat, un événement majeur du paysage scientifique parisien.

Les différentes sessions orales et posters ont permis aux étudiants de présenter leurs productions scientifiques et d'engager des échanges interdisciplinaires particulièrement enrichissants. Autre innovation majeure de cette édition placée sous le thème « Échelles de temps », des sessions orales de vulgarisation scientifique ont sensibilisé les participants aux dynamiques de recherche qui rythment la vie des laboratoires. Particulièrement appréciées, ces présentations ont connu un franc succès.

Comme chaque année, une journée « Emploi » consacrée à l'insertion professionnelle était organisée, en présence de nombreux acteurs du monde académique et de la recherche. Point d'orgue de ce congrès, la session de clôture a vu l'intervention de scientifiques prestigieux qui ont abordé un large éventail de sujets allant de la géobiologie (Sophie Verheyden), aux mathématiques (Amaury Lambert), en passant par la philosophie des sciences (Alexandre Moatti).

For the first time since its creation, this 26th edition of the PhD candidate Congress (i.e. CDD) was organized and led by 1st year PhDs belonging to the two tracks of the STEP'UP PhD program ("Earth and Environmental Sciences" and "Physics of the Universe"). The IPGP PhD candidates, taking advantage of their close links with those of the ENS, welcomed their colleagues from the APC, AIM, LPNHE and LPTHE laboratories, as well as about ten guest European PhD candidates. With more than 176 participants over five days, the CDD has reached a new milestone and is becoming, at the PhD level, a major event in the Parisian scientific landscape.

The various oral and poster sessions enabled PhDs to present their scientific productions and engage in particularly enriching interdisciplinary exchanges. Another major innovation of this edition, placed under the theme "Time scales", oral sessions of scientific popularization made participants aware of the research dynamics that punctuate the life of laboratories. These presentations were particularly appreciated and were a great success.

As every year, an "Employment" day dedicated to professional integration was organized, in the presence of many players from the academic and research world. The high point of the congress was the closing session, which saw the intervention of prestigious scientists who addressed a wide range of topics from geobiology (Sophie Verheyden), mathematics (Amaury Lambert), and philosophy of science (Alexandre Moatti).



Tara Shreve Doctorante en tectonique et mécanique de la lithosphère Lithosphere Tectonics and Mechanics PhD candidate

Le cœur de ma thèse consiste à développer une technique d'observation satellitaire appelée l'interférométrie radar à synthèse d'ouverture (InSAR, en anglais), permettant de suivre l'activité de certains des volcans les plus actifs au monde, situés dans des régions particulièrement isolées. Il est possible avec InSAR de mesurer les déformations de surface de ces volcans et ainsi de détecter et de modéliser les stockages et les mouvements de magma en profondeur.

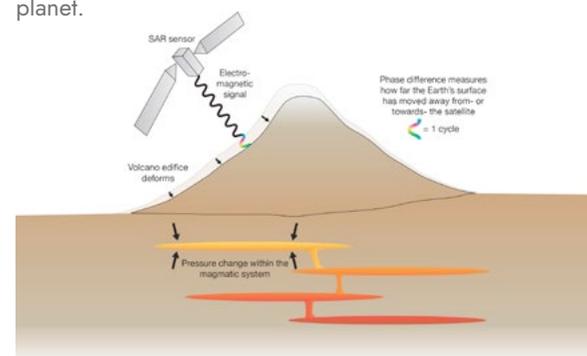
Ces observations, couplées avec des données de télédétection des gaz volcaniques (SO₂), d'imagerie satellitaire dans les domaines optique et thermique, mais aussi avec des observations au sol, m'ont permis d'étudier le cas du volcan insulaire Ambrym, au Vanuatu (**plus de détails page 38**).

Cette méthode de télédétection satellitaire a permis de révéler cet évènement volcanique majeur, qui aurait pu passer inaperçu à partir d'observations au sol et être interprété comme le résultat d'une éruption modérée.

The central work of my PhD uses satellite-based remote sensing observations combined with a technique called interferometric synthetic aperture radar (InSAR) to monitor remote volcanoes from a safe distance. InSAR provides measurements of ground movements at a volcano's surface, and allows for subsequent modeling of underground magma storage and transport.

In particular, we couple InSAR ground deformation with sulphur dioxide degassing, thermal anomalies, satellite optical images, and ground-based observations to study Ambrym volcano, Vanuatu (**for more details see page 38**).

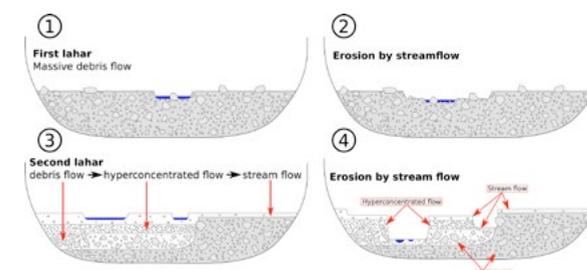
Space-based monitoring allows for studying and documenting similar volcanic events, which otherwise may go unnoticed, at the myriad of remote volcanoes on the planet.



Marc Peruzzetto Doctorant en sismologie Seismology PhD student

Les écoulements gravitaires, tels que les glissements de terrains et les laves torrentielles, sont des phénomènes difficiles à prédire et potentiellement dangereux pour les populations et les infrastructures. L'analyse précise des aléas associés est complexe, du fait de notre compréhension partielle des lois physiques qui s'appliquent. L'objectif de cette thèse est de compléter l'utilisation de relations empiriques par des simulations numériques permettant de mieux quantifier les caractéristiques de ces écoulements.

L'étude de la falaise Samperre, en amont de la rivière du Prêcheur, en Martinique, est intéressante car elle connaît des épisodes réguliers d'effondrements importants depuis les années 1950, dont le dernier a eu lieu en 2018. Les matériaux accumulés en pied de falaise sont remobilisés dans la rivière, générant des coulées de boue appelées lahars, menaçant le village du Prêcheur à l'embouchure de la rivière. Des scénarios réalistes ont été définis à partir d'observations de terrain pour modéliser les effondrements de la falaise et la propagation des lahars dans la rivière (dont les lahars destructeurs de 2010). Ces simulations permettent de mieux caractériser la géométrie des éboulis déjà effondrés ainsi que ceux qui seraient générés lors d'une prochaine déstabilisation de la falaise, mais également la vitesse et le volume des lahars résultants. Les résultats obtenus pourront contribuer à une meilleure gestion des risques associés à ces phénomènes.



Gravitational flows, such as landslides and debris flows, are extremely difficult to predict and potentially dangerous for the population and infrastructures. Because we understand only partially the physical process at stake, a detailed hazard analysis is complex. The aim of the PhD is to use numerical simulations in addition to empirical laws to better quantify the characteristics of these flows.

We study in particular the Samperre cliff, in Martinique (Lesser Caribbean), upstream the Prêcheur river: since the 1950s, it has undergone several episodes of massive destabilisations. The last one was in 2018. The screens at the bottom of the cliff are then carried away by the river, generating mudflows (also called lahars) that threaten the Prêcheur village, at the mouth of the river. In order to model the collapse of the cliff and the lahars (including the destructive 2010 lahars), realistic scenarios have been defined thanks to field observations. The resulting simulations help better characterize the geometry of debris reservoirs replaced by previous and future potential destabilisations, as well as the velocity and volumes of subsequent lahars. Our results may improve the management of the risks associated to these phenomena.



Contacts :

Doctorante / PhD candidate : Tara Shreve - shreve@ipgp.fr
Directeur de thèse / Thesis supervisor : Raphaël Grandin - grandin@ipgp.fr



Contacts :

Doctorant / PhD candidate : Marc Peruzzetto - peruzzetto@ipgp.fr
Directeurs de thèse / Thesis supervisors : Anne Mangeney - mangeney@ipgp.fr & Gilles Grandjean - g.grandjean@brgm.fr



Relations internationales International relationships

Différentes actions ont été menées en 2019 par le service des relations internationales et plusieurs outils ont été améliorés, notamment avec le lancement d'Université de Paris :

> Bourses MIEM (Mobilité Internationale Entrante en Master) :

Afin d'attirer les meilleurs étudiants étrangers en master et doctorat, six bourses annuelles MIEM ont été distribuées, avec l'accès à un cursus complet comprenant des cours en anglais. Ces bourses permettent de prendre en charge le coût de la vie et du logement à Paris. Les étudiants internationaux représentent chaque année environ un tiers des thèses préparées à l'IPGP. Cette initiative est fortement soutenue par l'IDEX Université de Paris.

> Chercheurs invités :

53 professeurs ou chercheurs du monde entier ont été invités au cours de l'année académique 2018-2019 pour une durée minimale d'un mois (voir la liste ci-après). Ils participent activement aux projets scientifiques communs et au programme d'échanges d'étudiants étrangers. Un dossier est établi pour chacun d'eux et envoyé à tous les membres de l'IPGP, résumant leur projet de recherche, le chercheur invitant et l'emplacement de leur bureau.

During the last year, with the launch of Université de Paris, different actions have been taken by the international office and several tools have been improved:

> MIEM fellowships (International Incoming Mobility Master's Degree):

For attracting the best Master students and PhD candidates, six annual fellowships (MIEM) have been distributed to foreign students who have access to a complete curriculum with courses in English. These fellowships enable them to support the cost of living and accommodation in Paris. So far, foreign students contribute for one third to PhD prepared at IPGP. This initiative is strongly supported by the Université de Paris IDEX.

> Invited scientists:

53 professors or researchers from all over the world were invited during the academic year 2018-2019 for at least one month (see the list below). They efficiently contribute to joint scientific projects and exchange of students. A brief is issued for each guest and sent to all IPGP members, summarizing their research project, the inviting IPGP scientist, and their office location.



> Signatures d'accords internationaux (Memorandum of Understanding) :

De nombreux MoUs ou autres accords officiels ont été signés avec des institutions étrangères en 2019, que ce soit pour assurer le fonctionnement et la maintenance des instruments et réseaux sur le terrain, pour soutenir des projets scientifiques, ou encore pour améliorer les échanges d'étudiants et de chercheurs. Au-delà des simples renouvellements, de nouveaux accords ont vu le jour comme ceux signés avec la Faculté d'Ingénierie / École d'Ingénieurs de l'Université de Kyoto (Japon) ou avec l'ITB (Institut de Technologie de Bandung, Indonésie).

> Organisation de workshops scientifiques :

L'IPGP organise ou participe à des workshops avec les institutions de recherche les plus prestigieuses : LANL (Los Alamos National Laboratory - USA) ; Caltech-JPL (California Institute of Technology - NASA's Jet Propulsion Laboratory - USA) ; NSU (Novosibirsk State University - Russie) ; UCL (University College of London - Royaume-Uni)... Un workshop a ainsi été organisé à l'IPGP à Paris en octobre 2019 avec l'ERI (Earthquake Research Institute, Université de Tokyo), auquel ont participé plus d'une

> Signatures of MoUs (Memorandum of Understanding):

Several MoUs or official agreements with numerous foreign institutions have been signed in 2019, either to secure the operation and maintenance of instruments and networks on the field, for facilitating and supporting scientific projects or to improve the exchanges of students and researchers. Some of them are extensions of previous ones, but there are new ones with the Faculty of Engineering / Graduate School of Engineering of Kyoto University or with ITB (Institute of Technology of Bandung, Indonesia).

> Organization of scientific workshops:

The IPGP participates to or organizes scientific workshops with key research institutions: LANL (Los Alamos National Laboratory - USA) ; Caltech-JPL (California Institute of Technology - NASA's Jet Propulsion Laboratory - USA) ; NSU (Novosibirsk State University - Russia) ; UCL (University College of London - UK)... For example, a workshop was organized in October 2019 between ERI (Earthquake Research Institute, University of Tokyo) and the IPGP in Paris attended by more than 20 scientists from ERI and 50 scientists from IPGP. The goals were to

take stock of existing collaborative projects and to explore potential topics of joint research, such as monitoring and understanding of active processes (earthquakes, volcanoes, environmental events), the development of innovative instrumentation, mainly on the seafloor at the regional and global scales.

> Participation à des réunions et conférences internationales :

Le service des relations internationales continue d'apporter un soutien financier aux chercheurs participant activement aux congrès, aux universités d'été et aux workshops les plus importants, en tant que présidents de séance ou présentateurs invités. Par ailleurs, l'IPGP tient un stand dans les grands congrès internationaux tels que celui de l'AGU 2019 à San Francisco.

take stock of existing collaborative projects and to explore potential topics of joint research, such as monitoring and understanding of active processes (earthquakes, volcanoes, environmental events), the development of innovative instrumentation, mainly on the seafloor at the regional and global scales.

> Participation to international meetings and conferences:

The international office continues to provide financial support to scientists actively participating in major international congresses, summer schools and workshops, as session chairs or invited presenters. IPGP has a booth (or academic showcase) in major international congresses such as the most recent AGU 2019 fall meeting in San Francisco.



Scientifiques invités 2019 2019 visiting scientists

Invité Guest	Affiliation Affiliation	Invitant Inviting	Équipe Team
BAGIYA S. Mala	Indian Institute of Geomagnetism (IIG), Navi Mumbai, India	ASTAFYEVA Elvira	Planétologie et sciences spatiales Planetology and space sciences
BIZZARRO Martin	Sustainability Science Center, Univ. of Copenhagen, Denmark	MOYNIER Frédéric	Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale Cosmochemistry, astrophysics and experimental geophysics
BLANTER Elena	Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia	COURTILLOT Vincent LE MOUËL Jean-Louis	Paléomagnétisme Paleomagnetism
BRODHOLT John	University College London (UCL), UK	BADRO James	Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale Cosmochemistry, astrophysics and experimental geophysics
BUFFETT Bruce	University of California Berkeley, USA	BADRO James AUBERT Julien	Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale Cosmochemistry, astrophysics and experimental geophysics
CAPSON Todd	Consultant	BOYE Marie	Biogéochimie environnementale Environmental biogeochemistry
CARRIGAN Charles	Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA	PILI Eric	Géomatériaux Geomaterials
CARRIZO Daniel	Advanced Mining Technology Center, University of Chile, Santiago, Chile	LACASSIN Robin	Tectonique et mécanique de la lithosphère Lithosphere tectonics and mechanics
DAVAASUREN Ganzorig	Institute of Astronomy and Geophysics, Ulaanbaatar, Mongolia	KLINGER Yann	Tectonique et mécanique de la lithosphère Lithosphere tectonics and mechanics
DAY James	University of California San Diego (UCSD), USA	MOYNIER Frédéric	Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale Cosmochemistry, astrophysics and experimental geophysics
DRUHAN Jennyfer	School of Earth, Society & Environment, University of Illinois, Urbana, USA	GAILLARDET Jérôme	Géochimie des enveloppes externes External envelopes geochemistry

Invité Guest	Affiliation Affiliation	Invitant Inviting	Équipe Team
EGLI Ramon	Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna, Austria	CARLUT Julie	Paléomagnétisme Paleomagnetism
ESPOSTI ONGARO Tomaso	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Pisa, Italy	KOMOROWSKI Jean-Christophe	Systèmes volcaniques Volcanic systems
FIEBIG Jens	Institut für Geowissenschaften, J. W. Goethe-Universität Frankfurt, Germany	BONIFACIE Magali	Géochimie des isotopes stables Stable isotopes geochemistry
GOLD Ryan	Geologic Hazards Science Center, USGS, Denver, USA	KLINGER Yann	Tectonique et mécanique de la lithosphère Lithosphere tectonics and mechanics
GRÀCIA MONT Eulàlia	Institut de Ciències del Mar (CSIC), Barcelona, Spain	ESCARTIN Javier	Géosciences marines Marine geosciences
GUDKOVA Tamara	Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia	LOGNONNÉ Philippe	Planétologie et sciences spatiales Planetology and space sciences
HAMELIN Cédric	University of Bergen, Norway	ESCARTIN Javier	Géosciences marines Marine geosciences
IGEL Heiner	Ludwig Maximilians University Munich, Germany	MONTAGNER Jean-Paul	Sismologie Seismology
KAWAKATSU Hitoshi	Earthquake Research Institute (ERI), The University of Tokyo, Japan	MONTAGNER Jean-Paul	Sismologie Seismology
KHOKHLOV Andrei	Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia	HULOT Gauthier	Géomagnétisme Geomagnetism
KOSSOBOKOV Vladimir	Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia	COURTILLOT Vincent LE MOUËL Jean-Louis	Paléomagnétisme Paleomagnetism
KRISHNAN Sajeew	Centre for Earth Sciences, Indian Institute of Science, Bangalore, India	SIVRY Yann	Biogéochimie environnementale Environmental biogeochemistry
LUDDEN John	British Geological Survey, Swindon, UK	CHAUSSIDON Marc	Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale Cosmochemistry, astrophysics and experimental geophysics

Invité Guest	Affiliation Affiliation	Invitant Inviting	Équipe Team
MC CLOY John	Washington State University, Pullman, USA	NEUVILLE Daniel	Géomatériaux Geomaterials
MIKHAILOV Valentin	Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia	DIAMENT Michel	Géodésie Geodesy
MORGAN Dan	Institute of Geophysics and Tectonics, University of Leeds, UK	BOUDON Georges	Systèmes volcaniques Volcanic systems
NARBONA Gladys	Universidad de Sevilla, Spain	MANGENEY Anne	Sismologie Seismology
NAVA Bruno	International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy	COÏSSON Pierdavide	Géomagnétisme Geomagnetism
NEUFELD Jerome	BP Institute, University of Cambridge, UK	LAJEUNESSE Eric	Dynamique des fluides géologiques Geological fluids dynamics
NISHIDA Kiwamu	Earthquake Research Institute (ERI), The University of Tokyo, Japan	STUTZMANN Eléonore	Sismologie Seismology
O'NEILL Hugh	Research School of Earth Sciences, Australian National University (ANU), Canberra, Australia	SIEBERT Julien	Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale Cosmochemistry, astrophysics and experimental geophysics
OBARA Kazushige	Earthquake Research Institute (ERI), The University of Tokyo, Japan	VILOTTE Jean Pierre	Sismologie Seismology
PANNING Mark	Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA	LOGNONNÉ Philippe	Planétologie et sciences spatiales Planetology and space sciences
PAVLOV Vladimir	Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia	GALLET Yves	Paléomagnétisme Paleomagnetism
PILORZ Stuart	SETI Institute, Mountain View, USA	FERRARI Cécile	Planétologie et sciences spatiales Planetology and space sciences
POWER John	Alaska Volcano Observatory, USGS, Anchorage, USA	BURTIN Arnaud	Systèmes volcaniques Volcanic systems
RANVILLE James	Colorado School of Mines, Golden, USA	BENEDETTI Marc	Biogéochimie environnementale Environmental biogeochemistry
SAAL Alberto	Brown University, Providence, USA	CHAUSSIDON Marc	Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale Cosmochemistry, astrophysics and experimental geophysics

Invité Guest	Affiliation Affiliation	Invitant Inviting	Équipe Team
SACHPAZI Maria	Institute of Geodynamics, National Observatory of Athens, Greece	BERNARD Pascal	Sismologie Seismology
SCHIMMEL Martin	Institute of Earth Sciences Jaume Almera (ICTJA-CSIC), Barcelona, Spain	STUZMANN Eléonore	Sismologie Seismology
SHAHAR Anat	Carnegie Institution for Science, Washington, USA	BADRO James	Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale Cosmochemistry, astrophysics and experimental geophysics
SHAPOVAL Alexander	Higher School of Economics University, Moscow, Russia	LE MOUËL Jean-Louis	Géomagnétisme Geomagnetism
SHEBALIN Petr	Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia	NARTEAU Clément	Dynamique des fluides géologiques Geological fluids dynamics
SINHA Rajiv	Indian Institute of Technology, Kanpur, India	MÉTIVIER François	Dynamique des fluides géologiques Geological fluids dynamics
SZYMCZAK Piotr	Institute of Theoretical Physics, University of Warsaw, Poland	DEVAUCHELLE Olivier	Dynamique des fluides géologiques Geological fluids dynamics
TENG Fangzhen	University of Washington, Seattle, USA	MOYNIER Frédéric	Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale Cosmochemistry, astrophysics and experimental geophysics
TRINDADE Ricardo	University of São Paulo, Brazil	ADER Magali	Géochimie des isotopes stables Stable isotopes geochemistry
TSOULIS Dimitrios	Aristotle University of Thessaloniki (AUTH), Greece	JAMET Olivier	Géodésie Geodesy
VOROBYEVA Inessa	Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia	NARTEAU Clément	Dynamique des fluides géologiques Geological fluids dynamics
WILDING Martin	University College London (UCL), UK	NEUVILLE Daniel	Géomatériaux Geomaterials
WITTMANN-OELZE Hella	German Research Centre for Geosciences (GFZ), Potsdam, Germany	BOUCHEZ Julien	Géochimie des enveloppes externes External envelopes geochemistry



Partenariats Partnerships

En 2019 l'activité de l'institut en partenariat avec le secteur industriel est restée soutenue et a fait l'objet de réussites scientifiques et techniques partagées.

Un consortium composé de membres de l'IPGP, du CEA-Marcoule, des industriels Baccarat, Arc, Pochet de Courval et Cookware, travaille dans le cadre d'une ANRI sur le contact alimentaire des verres. Les nouvelles réglementations européennes REACH (qui sécurisent la fabrication et l'utilisation des substances chimiques dans l'industrie) pourraient avoir un impact économique majeur sur les industriels du verre en les obligeant à modifier leurs formulations et par conséquent leurs procédés de fabrication. L'étude de la capacité du verre à retenir ou libérer des éléments toxiques est donc primordiale.

L'objectif de ce consortium est de décrire les mécanismes de libération (métaux lourds et de transition) au cours de l'altération correspondant aux conditions réelles d'utilisation des principaux verres du commerce. La méthodologie est basée sur des caractérisations de pointe des verres sains et altérés, associées à des expériences spécifiques d'altération. A partir des résultats obtenus, des traitements spécifiques de surface adaptés aux procédés industriels pourront être testés et développés pour limiter la solubilisation d'éléments nocifs et permettre ainsi aux industries verrières de répondre aux nouvelles réglementations.

In 2019, the Institute's activity in partnership with the industrial sector remained sustained and was the subject of shared scientific and technical successes.

A consortium made up of members of IPGP, CEA-Marcoule, manufacturers Baccarat, Arc, Pochet de Courval, Cookware, is working on ANRI on the food contact of glasses. The new REACH regulations could have major economic consequences for the whole glass industry. Thus, it has become crucial to examine glass ability to retain or release hazardous elements and if needed, to be able to propose recommendations.

Our objective is to fully describe the mechanisms of element releases (notably heavy metals and transition metals) during aqueous dissolution of major commercial glasses in real conditions of use. The methodology is based on advanced structural characterization of pristine and weathered glasses, associated with specific leaching experiments. Based upon these results, specific glass surface treatments adapted to the industrial processes could be tested and developed, to limit the release of hazardous elements. These treatments might provide an opportunity for glass companies to respond to the new regulations and will have a major economic impact if this enables unmodified glass formulations, and consequently production processes.



Contact : neuille@ipgp.fr



Légende image page de gauche :

De gauche à droite : Marc Chaussidon (directeur de l'IPGP), Ahmada Al Karani (chairman du management committee du consortium Fly-Lion 3, directeur de Comores Câbles), Jean-Luc Vuillemin (Executive Vice President de Orange International Networks Infrastructure & Services, président du comité de surveillance de Orange Marine)
 From left to right: Marc Chaussidon (IPGP director), Ahmada Al Karani (chairman of the management committee of the Fly-Lion 3 consortium, Comoros Cables director), Jean-Luc Vuillemin (Executive Vice President of Orange International Networks Infrastructure & Services, chairman of the supervisory board of Orange Marine)

Le projet SIDEREC (Siderophores assisted Biorecovery of Technology Critical Elements (TCEs) : Gallium (Ga), germanium (Ge) and indium (In) from end-of-life products), coordonné par l'IPGP, a été sélectionné pour financement dans le cadre de l'appel à propositions ERA-MIN 2.

The SIDEREC project (Siderophores assisted Biorecovery of Technology Critical Elements (TCEs): Gallium (Ga), germanium (Ge) and indium (In) from end-of-life products) coordinated by IPGP was selected in the ERA-MIN 2 call for tenders.

L'objectif de ce projet est de récupérer le gallium (Ga), le germanium (Ge) et l'indium (In) à partir de D3E (déchets d'équipements électriques et électroniques) afin de pallier la pénurie d'approvisionnement de ces éléments critiques. En raison de leurs faibles concentrations et de la présence d'un grand nombre de contaminants, aucune technologie n'est actuellement disponible pour les recycler. Par conséquent, une extraction hautement sélective est nécessaire, dans la mesure où il a été démontré que les sidérophores se lient sélectivement à Ga, In et Ge même lorsque ces métaux sont présents dans de très faibles concentrations.

The SIDEREC project is aiming at recovering Gallium (Ga), germanium (Ge) and indium (In) from end-of-life products end-of-life (EOL) products as a way to overcome the shortage of these critical elements. However, there are no technologies available for recycling of these critical elements due to their low concentrations and presence of large number of contaminants. A highly selective and sensitive solvent, ligand or reaction is needed to recover these critical elements. Siderophores has been shown to bind selectively bind to Ga, In and Ge even when these metals are present in very low concentrations.

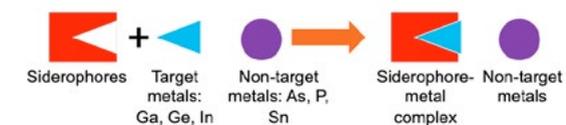
Orange et les membres du consortium FLY-LION3 (Lower Indian Ocean Network), la Société Réunionnaise du Radiotéléphone et Comores Câbles, ont signé une convention avec l'IPGP pour mettre à disposition du Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA) une paire de fibres optiques afin d'expérimenter une nouvelle technique d'écoute des mouvements sismiques de la région (**plus d'informations sur la crise sismo-volcanique actuelle page 58**).

Orange and the members of the FLY-LION3 (Lower Indian Ocean Network) consortium, the Société Réunionnaise du Radiotéléphone and Comores Câbles, have signed an agreement with the IPGP to provide the Mayotte Volcanological and Seismological Monitoring Network (REVOSIMA) with a pair of optical fibres to experiment with a new technique for listening to seismic movements in the region (**more information on the current seismic-volcanic crisis page 58**).

Mis en service le 10 octobre 2019, long de 400 km, le câble sous-marin très haut débit FLY-LION3 renforce la connectivité dans l'océan Indien en reliant Moroni (Grande Comore) et Mamoudzou (Mayotte). Pour l'IPGP, il s'agit d'une mission d'observation inédite sur un câble sous-marin à grande échelle. A l'instar des fibres terrestres, les câbles sous-marins ont la capacité non seulement de transporter les communications, mais aussi de repérer les vibrations du sol sur lequel est posée la fibre (on parle de Fibre Optic Sensor - FOS). Les équipements placés à l'extrémité de la paire de fibres permettent d'utiliser celle-ci comme une antenne et ainsi de mieux localiser les signaux sismiques de la région, depuis Kaweni sur une distance d'environ 50 km en direction du sud-est de Mayotte.

Commissioned on 10 October 2019, the 400 km long FLY-LION3 ultra-broadband submarine cable strengthens connectivity in the Indian Ocean by linking Moroni (Grande Comore) and Mamoudzou (Mayotte). For the IPGP, this is an unprecedented observation mission on a large-scale submarine cable. Like terrestrial fibres, submarine cables have the capacity not only to carry communications, but also to detect vibrations in the ground on which the fibre is laid (we refer to a Fibre Optic Sensor - FOS). The equipment placed at the end of the fibre pair allows the fibre pair to be used as an antenna and thus to better locate seismic signals in the region, from Kaweni over a distance of about 50 km southeast of Mayotte.

 **Contact :** arnaudl@ipgp.fr



Capacité de liaison sélective des sidérophores vers les métaux cibles
 Selective binding ability of the siderophores towards the target metals
 © IPGP

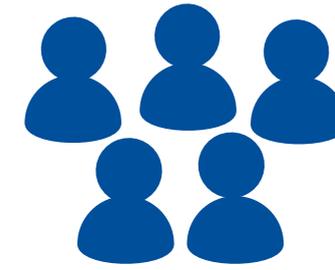
Il s'agira donc d'optimiser à la fois la sélection et la production adéquates de sidérophores, mais aussi l'accès des sidérophores aux métaux cibles dans les D3E. Une fois la lixiviation des TCEs cibles réussie, la décomplexation et la récupération des TCEs et des sidérophores seront effectuées par la mise en œuvre de la technologie brevetée Gallophore.

The SIDEREC project aims to tackle two main challenges in the recovery of critical elements from their EOL products using siderophores. The challenges are 1) Right selection and production of siderophores, 2) Access of siderophores to the target critical elements in EOL products. Upon successful leaching of target critical elements and siderophore complexes, the decomplexation, and recovery of critical elements and siderophores will be carried out by implementing the Gallophore technology.

Ce projet, dans lequel sont impliqués des partenaires académiques et industriels d'Allemagne (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf et ASA Spezialenzyme GmbH) et du Chili (Universidad Catolica del Norte), contribuera à améliorer la compétitivité de l'UE en matière de récupération et de recyclage des ressources.

This project will help in improving EU competitiveness in resource recovery and recycling. Academic and industrial partners from Germany (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf and ASA Spezialenzyme GmbH) and Chile (Universidad Catolica del Norte) are involved this project.

 **Contact :** vanhullebusch@ipgp.fr



Vie de l'établissement Institution's life



Mission InSight sur Mars : un an déjà !

Soirée anniversaire en présence de plusieurs membres de l'équipe InSight.

InSight mission on Mars: one year already!

Anniversary evening in the presence of several members of the InSight team.



Tribune « Vivre avec les risques » organisée par le Muséum national d'Histoire naturelle et l'IPGP autour de deux temps forts : un parcours ludique pour les plus jeunes et un « amphi interactif » pour les plus grands.

"Living with Risks" event organised by the National Museum of Natural History and the IPGP around two highlights: a fun trail for the youngest and an "interactive auditorium" for the oldest.



Conférence publique sur les premiers résultats scientifiques de la mission InSight dans le « Grand Amphithéâtre » historique de la Sorbonne.

Public conference about the first scientific results of the InSight mission in the historic "Grand Amphithéâtre" of the Sorbonne.



Exposition exceptionnelle « l'instrumentation sismologique à travers les âges » organisée par l'IPGP pour fêter les 80 ans du CNRS.

Exceptional exhibition "Seismological instrumentation through the ages" organised by the IPGP to celebrate the 80th anniversary of the CNRS.



Conférence publique et table ronde sur l'éruption volcanique sous-marine à Mayotte.

Public conference and round table on the underwater volcanic eruption in Mayotte.



Contribution d'Université de Paris au Grand Débat national sur le thème « Environnement et santé ». Débat avec des citoyens animé par des chercheurs de l'IPGP et des universités Paris Descartes et Paris Diderot.

Université de Paris' contribution to the Great National Debate on "Environment and Health". Debate with citizens led by researchers from the IPGP and the Universities of Paris Descartes and Paris Diderot.



Hackathon DigitalGeoHack qui a réuni pendant 48h des informaticiens, des spécialistes du machine learning et des experts en géosciences pour travailler sur la numérisation et l'automatisation de la recherche en géophysique, ainsi que sur l'exploration et les processus de production industrielle.

Hackathon DigitalGeoHack which brought together for 48 hours computer scientists, machine learning specialists and geoscience experts to work on the digitization and automation of geophysical research, exploration and industrial production processes.



Rallye des personnels d'Université de Paris avec parcours par équipe dans un quartier de Paris suivi d'un déjeuner convivial.

Université de Paris staff rally with a team tour in a Parisian district followed by a convivial lunch.



Visite de l'IPGP par les lycéens lauréats des Olympiades des géosciences régionales 2019.

Visit of the IPGP by the high school winners of the 2019 regional Geosciences Olympiad.



Concert philharmonique donné pour le Festival des idées par le Philogaia Orchestra, composé notamment de chercheurs et étudiants de l'IPGP, à partir des premières données enregistrées par le sismomètre SEIS sur Mars.

Philharmonic concert given for the Festival of Ideas by the Philogaia Orchestra, including researchers and students from the IPGP, based on the first data recorded by the SEIS seismometer on Mars.



Visite de l'IPGP par le Premier ministre et la Ministre de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation en amont de la remise des rapports des trois groupes de travail sur la future loi de programmation pluriannuelle de la recherche.

Visit to the IPGP by the Prime Minister and the Minister for Higher Education, Research and Innovation before the submission of the reports of the three working groups on the future law on multiannual research programming.



Cérémonie 2019 de remise des diplômes de l'UFR STEP (licence pro et masters)

2019 Graduation Ceremony of the STEP faculty (Licence Pro and Masters)



JAVA 2019 pour accueillir les nouveaux arrivants et leur présenter la vie associative d'Université de Paris. Animations, danses, théâtre, musique, jeux... se sont enchaînés sur le campus des Grands Moulins.

JAVA 2019 to welcome newcomers and introduce them to the associative life of Université de Paris. Animations, dances, theatre, music, games... were held on the Grands Moulins campus.

Rapport annuel**Institut de physique du globe de Paris**

1, rue Jussieu 75005 Paris

www.ipgp.fr

Conception et réalisation graphique

Service communication Medi@terre

mediaterre@ipgp.fr

Rédaction

Personnels de l'IPGP et service communication

Impression

Imp'Act Imprimerie, labellisée Imprim'vert (charte pour la réduction de l'impact environnemental, la traçabilité et le traitement des déchets) et PEFC (papier eco-responsable)

Traduction

Personnels de l'IPGP et Shannon Kiernan

Photos et illustrations

Banque d'images IPGP, AGU, ANU Media, Aubert, Barruol, BRGM, Centre des Politiques de la Terre, CNRS, Foix, Gallet, Gayer, Gérard, Guitreau, IFREMER, Jacques, Juhel, Lemoine, Livermore, Matignon (Florian David), MNHN, MAYOBS, NASA, Rosas-Carbajal, Saade, Sergeant, Shreve, Supiandi, UnivEarth, Université de Paris, Vallée

MERCI !

La direction et le service communication de l'IPGP remercient chaleureusement les chercheurs, enseignants-chercheurs, doctorants, ingénieurs, techniciens et personnels administratifs ayant participé à ce numéro.

Annual report**Institut de physique du globe de Paris**

1, rue Jussieu 75005 Paris

www.ipgp.fr

Graphic design and production

Medi@terre communication department

mediaterre@ipgp.fr

Drafting

IPGP staff and communication department

Print

Imp'Act Printing, labelled Imprim'vert (charter for the reduction of environmental impact, traceability and waste treatment) and PEFC (eco-responsible paper)

Translation

The IPGP staff and Shannon Kiernan

Photos and illustrations

IPGP image database, AGU, ANU Media, Aubert, Barruol, BRGM, Centre des Politiques de la Terre, CNRS, Foix, Gallet, Gayer, Gérard, Guitreau, IFREMER, Jacques, Juhel, Lemoine, Livermore, Matignon (Florian David), MNHN, MAYOBS, NASA, Rosas-Carbajal, Saade, Sergeant, Shreve, Supiandi, UnivEarth, Université de Paris, Vallée

THANK YOU!

The IPGP's management team and communication department would like to warmly thank the researchers, teacher-researchers, PhD students, engineers, technicians and administrative staff who participated in this issue.





En 2021, l'IPGP fête ses 100 ans !

Retrouvez la programmation du centenaire sur www.ipgp.fr

Institut de physique du globe de Paris - 1, rue Jussieu 75005 Paris - Tél.: +33 (0)1 83 95 74 00
www.ipgp.fr [@IPGP_officiel](https://twitter.com/IPGP_officiel) [Chaîne IPGP](https://www.youtube.com/channel/UCaDj8L8p8v8v8v8v8v8v8v8v8)