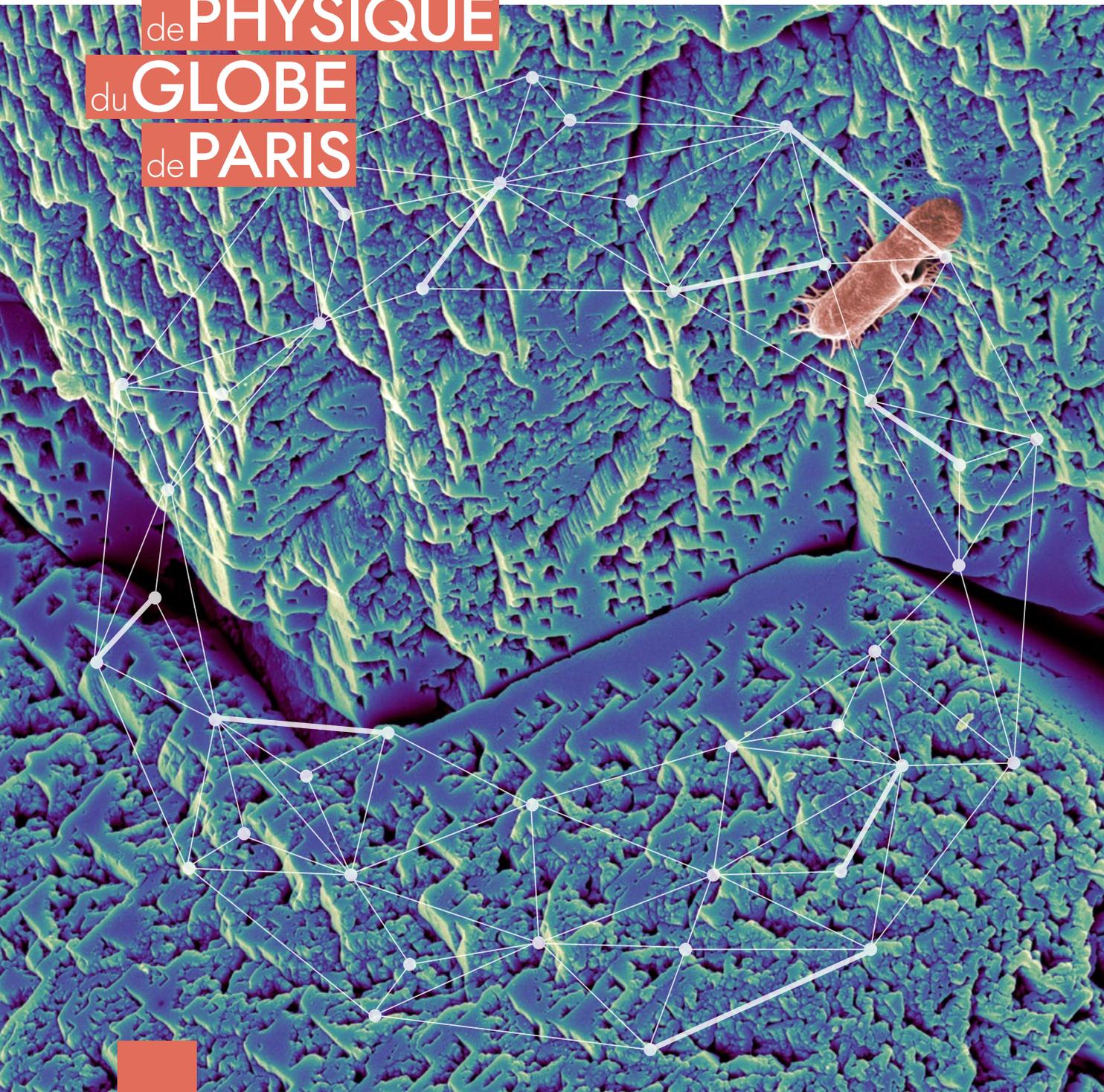


INSTITUT
de **PHYSIQUE**
du **GLOBE**
de **PARIS**



2020

Rapport annuel
Annual report



Sommaire

Contents

- 2** • Entretien avec Marc Chaussidon, Directeur de l'IPGP
Interview with Marc Chaussidon, IPGP Director
- 5** • Entretien avec Olivier Peyret, Président du CA
Interview with Olivier Peyret, Chairman of the Board of Directors
- 8** • L'établissement IPGP
The IPGP Institution
- 10** • Observatoires, thèmes, plateformes et équipes
Observatories, themes, platforms and teams
- 14** • Effectifs
Staff
- 16** • Chiffres clés
Key figures
- 17** • Pôle Drones IPGP
IPGP Drones Unit
- 18** • Vie de la recherche
Research life
- 22** • Prix et distinctions
Awards and honours
- 24** • Nouveaux chercheurs et enseignants-chercheurs
New researchers and teachers-researchers
- 28** • Intérieurs de la Terre et des planètes
Earth and planetary interiors
- 34** • Risques naturels
Natural hazards
- 42** • Système Terre
Earth system science
- 50** • Origines
Origins
- 56** • Entretien avec Fabrice R.Fontaine, sur le passage en vigilance jaune de la Montagne Pelée
Interview with Fabrice R.Fontaine, on the yellow alert status of Mount Pelée
- 60** • Observatoires
Observatories
- 80** • 70 ans de l'OVSG-IPGP, 40 ans de l'OVPF-IPGP : une surveillance bien rodée
70 years of OVSG-IPGP: 1950-2020, 40 years of OVPF-IPGP: Well-established monitoring
- 88** • Réseau des observatoires et stations de l'IPGP
Network of the IPGP observatories and stations
- 90** • Enseignement
Teaching
- 98** • Coup d'œil sur trois thèses
Three theses at a glance
- 104** • Relations internationales
International relationships
- 109** • Partenariats
Partnerships
- 114** • Vie de l'établissement
Institution's life

En couverture : Carbonates biogéniques (en bleu-vert) formés par la souche bactérienne *Sporosarcina pasteurii* (cellule micrométrique en orange) imagés par microscopie électronique à balayage.

Cover: Biogenic carbonates (blue-green) produced by the bacterial strain *Sporosarcina pasteurii* (micrometer cell in orange) imaged by scanning electron microscopy.

© A. Perron, S. Borensztajn, IPGP



Entretien avec Marc Chaussidon, Directeur de l'IPGP

Interview with Marc Chaussidon, IPGP Director

En parcourant ce rapport annuel, vous vous apercevrez que malgré les confinements successifs et les limitations imposées par la crise sanitaire à nos activités, l'IPGP est parvenu en 2020 à assurer au meilleur niveau ses trois missions fondamentales que sont la recherche, l'observation et la formation. Je remercie une nouvelle fois l'ensemble des membres de l'institut qui ont su tenir bon pendant cette période difficile.

Nos formations de licence et de master ont incontestablement été les plus impactées. Toutefois, les efforts déployés par nos collègues enseignants et administratifs pour faire évoluer les cours vers des solutions virtuelles, ainsi que nos investissements en outils numériques d'enseignement et de suivi des cours ont permis de limiter les effets de cette crise, notamment vis à vis des étudiants les plus en difficulté. Par ailleurs, nous avons cherché le plus possible à garder les laboratoires ouverts afin de minimiser les retards dans les stages de recherche de master et les travaux de doctorat et post-doctorat. L'annulation des missions de terrain, nécessaires aux travaux des doctorants et des post-doctorants, restent cependant le point noir de cette période, justifiant les financements accordés pour les prolongements des contrats de thèse et de post-doctorat. Les chiffres sont éloquentes : les dépenses de mission (déplacements pour des congrès ou réunions, travaux de terrain...) ont baissé de 1,1 M€ en 2020 ! Je souhaite évidemment qu'elles augmentent de nouveau en 2021, mais je crois aussi que ce coup de frein à nos déplacements et les solutions alternatives qui ont été

As you read through this annual report, you will see that despite the successive confinements and the limitations imposed on our activities by the health crisis, the IPGP managed to carry out its three core missions: research, observation and training to the highest standard in 2020. I would like to once again thank all the members of the Institute, who have stood firm during this difficult period.

Our bachelor's and master's courses have undoubtedly been the most affected. However, the efforts made by our teaching and administrative colleagues to shift courses over to online solutions, as well as our investments in digital teaching and course tools, have made it possible to limit the effects of this crisis, particularly with regard to the students with the greatest difficulties. In addition, we kept laboratories open as much as possible in order to minimise delays in master's research internships and doctoral and post-doctoral work. However, the cancellation of field trips needed for the work of PhD candidates and post-doctoral fellows remains the dark point of this period, justifying the funding granted for the extension of PhD and post-doctoral contracts. The figures speak for themselves: expenditure for these activities (travel for conferences and meetings, field work, etc.) dropped by €1.1 million in 2020! I obviously hope that they will increase again in 2021, but I also believe that this reduction in travel and the alternative solutions that have been put in place can help us to change our practices to limit the carbon footprint of our activities in the future.



Equipe de direction 2021 avec de gauche à droite / Management team 2021 with from left to right:
Marc Benedetti, Anne Le Friant, Marianne Greff, Marc Chaussidon, Gauthier Hulot, Arnaud Lemarchand et Antoine Charlot.
© IPGP

prises en place peuvent nous aider à faire évoluer nos pratiques pour limiter l'empreinte carbone de nos activités dans le futur.

Un point important de l'année 2020 a été l'élaboration du premier contrat d'objectifs et de moyens (COM) entre Université de Paris et l'IPGP. Nous avons ouvert le bal, suivi des trois facultés de l'université. L'intérêt de ce contrat, qui sera révisé annuellement, est d'assurer une politique cohérente pour l'enseignement et la recherche à l'échelle d'Université de Paris en fournissant une perspective de moyen et long terme, tant en termes d'objectifs que de moyens alloués par les deux établissements. Le COM 2020 met l'accent sur trois objectifs clés : (i) réussir l'intégration de l'IPGP au sein d'Université de Paris, (ii) fortifier la place de l'IPGP et d'Université de Paris dans les premières institutions mondiales en sciences de la Terre, des planètes et de l'environnement et (iii) renforcer les observatoires (volcanologiques, sismologiques, magnétiques, environnementaux) que l'IPGP pilote et s'ouvrir à de nouveaux champs d'observation en vue de répondre aux problématiques posées par le changement climatique et environnemental.

Comme chaque année, une part importante du rapport annuel est consacrée à la présentation de résultats marquants acquis dans les quatre thèmes de recherche de l'institut : Intérieurs de la Terre et des planètes, Risques naturels, Système Terre et Origines. Ces exemples ne représentant que la partie émergée de l'iceberg, je vous

The year 2020 notably saw the formulation of a first contract (COM) setting out the shared objectives and resources between Université de Paris and the IPGP. We got the ball rolling, followed by the three faculties of the university. The purpose of this contract, which will be revised annually, is to ensure a coherent policy between teaching and research at the level of the Université de Paris by providing a medium- and long-term perspective, both in terms of objectives and in terms of the resources allocated by the two institutions. The COM 2020 focuses on three key objectives: (i) successfully integrating the IPGP into Université de Paris, (ii) strengthening the position of the IPGP and Université de Paris among the world's leading institutions in Earth, planetary and environmental sciences, and (iii) strengthening the observatories (volcanological, seismological, magnetic, environmental) managed by the IPGP and expanding to new fields of observation with a view to addressing climate and environmental change issues.

As every year, a substantial part of the annual report is devoted to presenting the outstanding results achieved in the Institute's four research themes: Earth and planetary interiors, Natural hazards, Earth system science, and Origins. These examples are only the tip of the iceberg, and I strongly encourage you to visit the "Research News" section of our website to discover all the activities that take place at the IPGP. Note that the cover of this 2020 edition illustrates the growing importance of our work at the frontier between the living and the mineral.



Entretien avec Olivier Peyret, Président du CA Président de Schlumberger France Interview with Olivier Peyret, Chairman of the Board of Directors Chairman of Schlumberger France

invite vivement à aller consulter la rubrique « Actualités de la recherche » de notre site internet pour découvrir l'ensemble des activités menées à l'IPGP. Notez que la couverture de cette édition 2020 illustre l'importance grandissante de nos travaux situés à la frontière entre le vivant et le minéral.

La quatrième de couverture nous amène quant à elle en Martinique, où il a été décidé le 4 décembre 2020 de passer le niveau de vigilance de la Montagne Pelée de vert à jaune, signifiant une réactivation du volcan pouvant conduire à une activité éruptive à l'échelle de quelques années à quelques mois. Aucune activité hydrothermale n'avait été enregistrée depuis 1970, la dernière éruption magmatique datant de 1932. Des premiers signes avant-coureurs de réactivation sont apparus en avril 2019, se traduisant par une augmentation de l'activité sismique, suivie de l'apparition d'autres signaux en novembre. Toute corrélation entre le réveil de la « Vieille Dame » et le déménagement en 2019 de l'observatoire, depuis le bâtiment historique du Morne des Cadets construit après l'éruption de 1935, vers le nouvel observatoire situé à l'habitation Blondel, est fortuite ! Le suivi de la réactivation de la Montagne Pelée est au cœur des travaux de l'OVSM et de l'IPGP.

Enfin, au moment où j'écris cet éditorial, je viens d'être nommé pour un second mandat à la direction de l'IPGP. Je remercie toutes celles et tous ceux qui m'ont fait confiance pour cette responsabilité que je tâcherai d'exercer au mieux des intérêts de toute la communauté IPGP.

The back cover takes us to Martinique, where the decision was made on 4 December 2020 to raise the alert level for Mount Pelée from green to yellow, meaning that the volcano could reactivate and erupt within the next few months or years. No hydrothermal activity had been recorded since 1970, with the last magmatic eruption being in 1932. The first signs of reactivation appeared in April 2019 in the form of increased seismic activity, followed by further signals in November. Any correlation between the reactivation of the "Vieille Dame" and the 2019 relocation of the observatory from the historical building of Morne des Cadets, built after the 1935 eruption, to the new observatory located at the Blondel dwelling, is fortuitous! Monitoring the reactivation of Mount Pelée is at the heart of the work of the OVSM and the IPGP.

Lastly, as I write this editorial, I have just been appointed for a second term as Director of the IPGP. I would like to thank all those who have placed their trust in me for this responsibility, which I will try to exercise in the best interests of the entire IPGP community.

Quelle année !

2020 nous a mis à l'épreuve ; elle a en effet instillé le doute et bousculé beaucoup de nos certitudes : doute sur notre futur professionnel, sur notre santé, sur notre capacité à résister à l'adversité, sur l'espérance d'un retour à la normale, sur la relation à l'autre, parfois, sur le sens même de notre existence au travail ou dans notre sphère privée. Ce doute et ce questionnement ont déclenché une profonde mutation dans notre société comme si nous réalisions enfin que nous sommes entrés dans le troisième millénaire et que demain sera différent. Les traits de cet avenir s'esquissent petit à petit : plus écologique, plus solidaire, plus collectif, plus numérique, plus souverain, plus scientifique, plus spirituel, plus inspirant.

Le monde a muté.

On pourrait se résigner et subir ou alors - et c'est mon cas - considérer que c'est un formidable espoir qui renaît car sur les nouvelles fondations, beaucoup reste encore à construire. Chacun d'entre nous a en effet maintenant l'opportunité de passer de simple spectateur de la transition à celui d'acteur bâtisseur animé par ce qui donne plus de sens à sa vie.

Bien sûr, un nouveau millénaire ça se construit petit à petit, pierre par pierre, mais déjà, ici à l'IPGP, de

What a year!

2020 has put us to the test. It has instilled doubt and shaken up many of our certainties: doubt about our professional future, about our health, about our ability to resist adversity, about the hope of a return to normality, about our relationship with others, and sometimes about the very meaning of our existence at work or in our private sphere. This doubt and questioning have triggered a profound change in our society, as if we are finally realising that we have entered the third millennium and that tomorrow will be different. The features of this future are gradually taking shape: it will be more ecological, more united, more collective, more digital, more sovereign, more scientific, more spiritual, and more inspiring.

The world has changed.

We could resign ourselves to the situation or - and this is my case - consider it as a hope reborn, with much to build on top of these new foundations. Each of us now has the opportunity to move from being merely a spectator of the transition to being an actor and builder, driven by what gives more meaning to our lives.

Of course, a new millennium is built little by little, stone by stone. But already, here at the IPGP, many initiatives herald an inspiring future, such as: rethinking the use of



Créée par Université de Paris, la Caisse des Dépôts et l'IPGP, la Fondation Université de Paris a l'ambition d'apporter des réponses aux enjeux de société en s'appuyant sur les forces vives et les pôles d'excellence de l'université.
 Created by Université de Paris, the Caisse des Dépôts and the IPGP, the Fondation Université de Paris aims to provide answers to society's challenges by drawing on the university's strengths and centres of excellence.
 © Fondation Université de Paris

nombreuses initiatives préfigurent un futur inspirant, comme par exemple : repenser l'utilisation du numérique dans les manières de travailler, faire évoluer nos formations en les rendant encore plus attractives en France et à l'international - maintenant que nous avons la responsabilité complète de tous les étudiants en sciences de la Terre, de l'environnement et des planètes d'Université de Paris, développer le Centre des politiques de la Terre et le Pôle spatial grâce au soutien de l'Idex, investir avec la Fondation Université de Paris de nouveaux champs de recherche en lien avec les défis de l'anthropocène, être à la pointe des développements instrumentaux et conceptuels pour la surveillance des quatre volcans actifs français en éruption ou en réactivation, découvrir de la vie à encore plus forte profondeur dans la croûte terrestre, avoir dans un futur très proche un sismomètre sur la Lune après Mars, redécouvrir la Géo-énergie et beaucoup plus encore.

En cette période de doute et d'incertitude, la science est plus que jamais un garde-fou aux extrêmes, à l'arbitraire et aux dérives dangereuses ainsi qu'un formidable outil de discernement et d'épanouissement. La mission de l'IPGP - Sciences pour la planète - en est d'autant plus inspirante et essentielle ; et alors que notre Institut va fêter son centenaire, nous comptons sur le leadership de Marc Chaussidon - dans son deuxième mandat de Directeur - entouré de ses équipes toujours aussi motivées pour mener l'Institut vers un avenir encore plus pertinent pour relever les défis de notre planète.

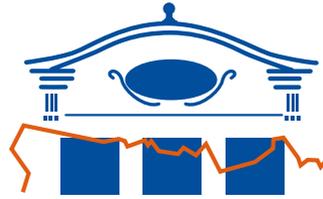
digital technology in the way we work; developing our training courses by making them even more attractive in France and internationally now that we have full responsibility for all students in Earth, environmental and planetary sciences at Université de Paris; developing the Earth Policy Centre and the Space Unit thanks to the support of Idex; investing with the Université de Paris Foundation in new fields of research related to Anthropocene questions; being at the forefront of instrumental and conceptual developments for monitoring the four active French volcanoes that are erupting or reactivating; discovering life at even greater depths in Earth's crust; having a seismometer on the Moon, after Mars, in the very near future; rediscovering geo-energy, and much more.

In these times of doubt and uncertainty, science is more than ever a safeguard against extremes, the arbitrary, and dangerous shifts, as well as a tremendous tool for providing insight and development. The IPGP's mission - Science for the Planet - is all the more inspiring and essential. And as our Institute celebrates its centenary, we are counting on the leadership of Marc Chaussidon, in his second term as Director, surrounded by his ever-motivated teams to lead the Institute towards a future that is even more pertinent to the challenges facing our planet.



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)
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)
Elisabeth 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)
Yan Lavallée	Professeur à l'Université de Liverpool Professor at the University of Liverpool



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 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.

Institut de recherche en géosciences de renommée mondiale, l'IPGP étudie la Terre et les planètes depuis le noyau jusqu'aux enveloppes fluides les plus superficielles, à travers l'observation, l'expérimentation et la modélisation. Une attention toute particulière est portée aux observations de longue durée, essentielles pour l'étude des systèmes naturels. L'IPGP a la charge de services d'observation labellisés en volcanologie, sismologie (terrestre et spatiale), magnétisme, gravimétrie et érosion. L'observatoire de Chambon-la-Forêt (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, post-doctoral fellows and PhD candidates 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 institute, IPGP studies the Earth and the planets from the core to the most superficial fluid envelopes, through observation, experimentation and modelling. Special attention is given to long-term observations that are essential for the study of natural systems. The IPGP is in charge of labelled observation services in volcanology, seismology (both terrestrial and spatial), magnetism, gravimetry and erosion. The 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 the EOST, two global geophysical networks that monitor magnetic field variations



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 plateformes expérimentales et analytiques de dernière génération et bénéficie d'un soutien technique de premier plan. Sa structure souple facilite les interactions entre les 17 équipes de recherche travaillant ensemble sur les quatre grandes thématiques de l'institut : intérieurs de la Terre et des planètes, risques naturels, système Terre et origines.

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

(INTERMAGNET network) and global seismic activity (GEOSCOPE network).

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 17 research teams working together on the four main themes of the institute: Interiors of the Earth and Planets, Natural Hazards, Earth System and Origins.

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
Jean-Marie SAUREL*
Resp. opérationnel
Operational Manager
** en remplacement d'Arnaud
LEMARCHAND depuis le
01/06/2021*
** replacing Arnaud LEMARCHAND
since 01/06/2021*

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

Fabrice R. FONTAINE*
** en remplacement d'Anne-Marie
LEJEUNE depuis le 01/09/20*
** replacing Anne-Marie LEJEUNE
since 01/09/2020*

> 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

> REVOSIMA
Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte
Volcanological and seismological monitoring network of Mayotte



Observatoires magnétiques
Magnetic Observatories

Vincent LESUR

Observatoire GEOSCOPE
GEOSCOPE Observatory

Martin VALLÉE

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 SATRIANO

Observatoire InSight
InSight Observatory

Philippe LOGNONNÉ



Intérieurs de la Terre et des planètes
Earth and Planetary Interiors

Cinzia FARNETANI

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	Alexandre FOURNIER Resp. scientifique Scientific Manager Geneviève MOGUILNY Resp. technique Technical Manager
Lithothèque marine de l'IPGP IPGP's Marine Rock Repository	Catherine MEVEL Resp. scientifique Scientific Manager
Pôle drones IPGP IPGP Drones Unit	Sébastien BONAIME Responsable Manager

Infrastructures nationales hébergées National hosted infrastructures

Parc de sismomètres « fond de mer » INSU-IPGP INSU-IPGP Ocean-Bottom Seismometers (OBS)	Wayne CRAWFORD Resp. scientifique Scientific Manager Romuald DANIEL Resp. technique Technical Manager
Centre de coordination et de diffusion de ForM@Ter (Pôle national de données et de services pour la Terre solide au sein de l'infrastructure de recherche Data Terra) Center of Coordination and Distribution of ForM@Ter (The national data and services centre for the Solid Earth, part of the French research infrastructure Data Terra)	Michel DIAMENT Directeur Director
IR (infrastructure de recherche) OZCAR (Observatoires de la zone critique, applications et recherche) RI (research infrastructure) OZCAR (Critical Zone Observatories, Applications and Research)	Jérôme GAILLARDET Responsable Manager

Équipes Teams

Biogéochimie environnementale Environmental Biogeochemistry	Rémi LOSNO
Biogéochimie à l'Anthropocène des éléments et contaminants émergents (ACE) Biogeochemistry at the Anthropocene of Elements and Emerging Contaminants	Yann SIVRY
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	Thomas GASTINE* <i>* en remplacement de Marianne GREFF depuis le 01/05/2021</i> <i>* replacing Marianne GREFF 01/05/2021</i>
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	Jean-Philippe METAXIAN
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, partiellement renouvelée début 2021 suite à la réélection de Marc Chaussidon, se compose du directeur de l'établissement (Marc Chaussidon), du directeur général des services (Antoine Charlot), du directeur adjoint chargé de la recherche et du spatial (Gauthier Hulot), de la directrice adjointe chargée des observatoires (Anne Le Friant), de la directrice adjointe chargée de l'enseignement (Marianne Greff, en remplacement de François Métivier), du directeur adjoint chargé des relations industrielles et internationales (Marc Benedetti, qui a repris une partie du portefeuille de Jean-Paul Montagner) et du directeur adjoint chargé de l'instrumentation (Arnaud Lemarchand), fonction créée lors du renouvellement de la direction.

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.

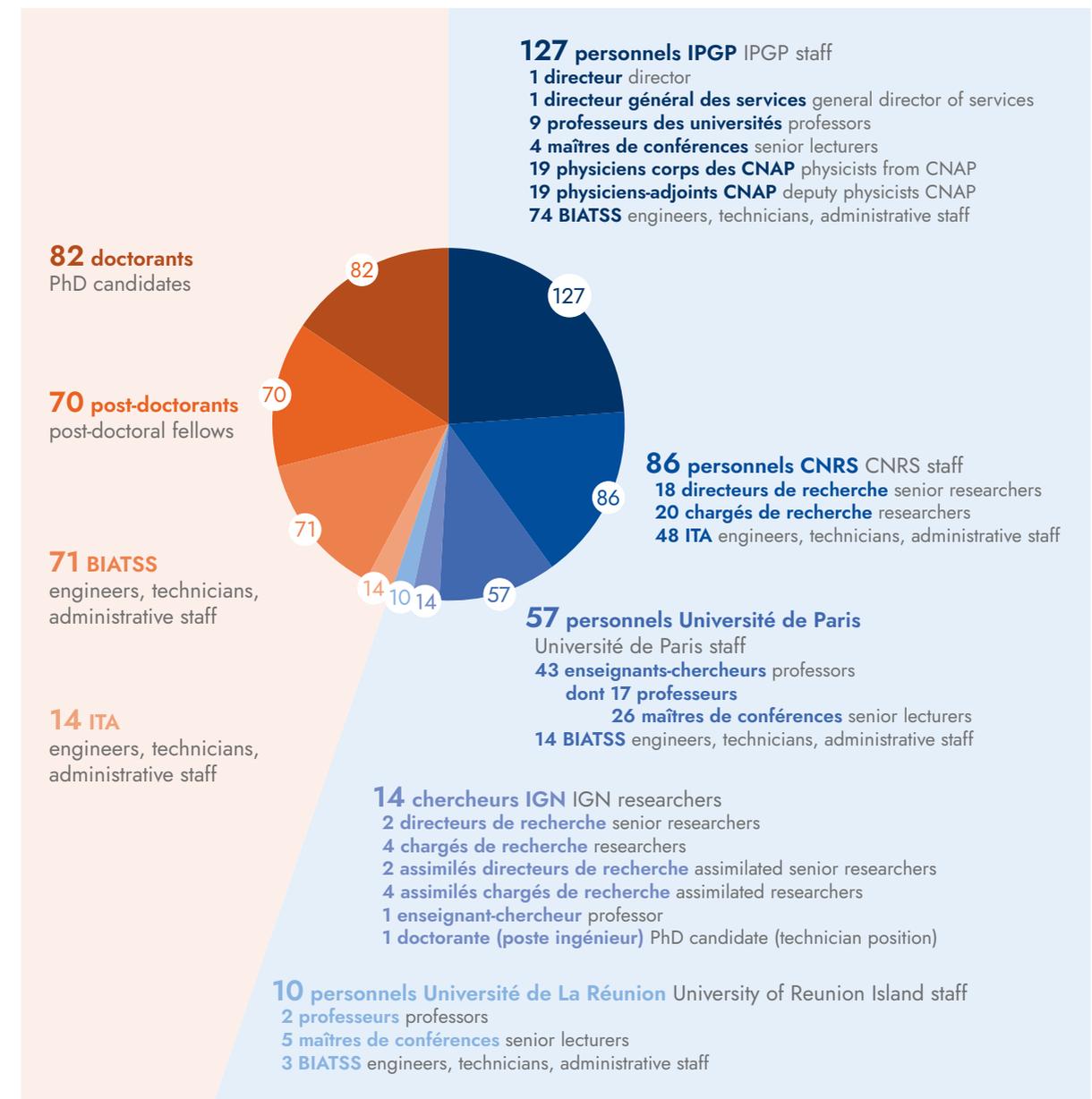
The IPGP's management team, partially renewed early 2021 following Marc Chaussidon re-election, includes its director (Marc Chaussidon), the general director of services (Antoine Charlot), the deputy director for research and space activities (Gauthier Hulot), the deputy director for observatories (Anne Le Friant), the deputy director for teaching (Marianne Greff, in succession to François Métivier), the deputy director for industrial and international relationships (Marc Benedetti, who now assumes part of Jean-Paul Montagner former responsibilities) and the deputy director in charge of instrumentation (Arnaud Lemarchand), position created upon the renewal of the management team.

The IPGP's steering system relies in particular on three bodies: a board of directors which is responsible for the general policy and strategy of the institution and votes the budget, a scientific council, which directs the research policy and a pedagogical council, which directs the teaching policy. Three other bodies exist: the technical committee, the joint committee of establishment and the safety and health council.

531
personnels en 2020 staff in 2020

237
non permanents non-permanent staff

294
permanents permanent staff



82 doctorants dont **30%** d'étrangers PhD candidates of which **30%** are foreigners
4 chercheurs et professeurs invités visiting researchers and professors

Chiffres clés

Key figures



100

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



40M€

budget total
pour l'année 2020
total budget
for the year 2020



4

grands thèmes de recherche
major research themes



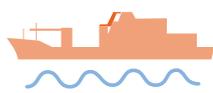
440

publications pour l'année 2020
dont 26 dans des revues prestigieuses
telles que Nature et Science
publications for the year 2020
including 26 in prestigious journals
such as Nature and Science



17

changements de niveau de vigilance
volcanique pour 3 éruptions
au Piton de la Fournaise
volcanic vigilance level changes for
3 eruptions at Piton de la Fournaise



6

campagnes océanographiques du
REVOSIMA autour de Mayotte en 2020,
dont 3 auxquelles a participé l'IPGP
REVOSIMA oceanographic campaigns around
Mayotte in 2020, including 3 in which the
IPGP participated



1

centre de données assurant la gestion et
la mise à disposition des données
d'observation de l'IPGP à la communauté
scientifique internationale
data center ensuring the management and
availability of IPGP observation data to the
international scientific community



12

position d'Université de Paris dans le
classement de Shanghai 2020 pour les
sciences de la Terre (l'IPGP comprenant
l'ensemble des sciences de la Terre d'UP)
position of Université de Paris in the
Shanghai 2020 ranking for Earth
Sciences (the IPGP includes all the Earth
sciences of UP)



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



3

projets Equipex+ retenus par le PIA3 dont
l'IPGP est un partenaire majeur
Equipex+ projects selected by the PIA3 in
which the IPGP is a major partner



2

ans de plus pour la mission martienne
InSight, prolongée jusqu'en décembre 2022
more years for the InSight Mars mission,
extended until December 2022



1

Labex UnivEarthS en association avec les
laboratoires APC et AIM
Labex UnivEarthS in association with APC
and AIM laboratories



Focus

Pôle Drones IPGP

IPGP Drones Unit

Depuis plusieurs années, l'utilisation de drones pour la recherche scientifique se développe de manière croissante, que ce soit dans le cadre d'observations ponctuelles ou d'activités de surveillance. Cette nouvelle technologie ouvre ainsi de nouvelles perspectives, au regard des observations traditionnelles de terrain, pour mener des recherches dans de nombreuses disciplines et notamment dans plusieurs domaines d'études développés à l'IPGP. En outre, ces drones constituent un véritable outil d'avenir pour une communication scientifique moderne et innovante.

Le pôle drones, animé à plein temps par Sébastien Bonaimé, organise et mutualise ces activités. Plusieurs télépilotes ont ainsi été formés et déclarés en 2020, en métropole et dans chacun des observatoires outre-mer, afin d'effectuer des missions drones dans la cadre de différents projets scientifiques :

Télépilotes - Paris : Sébastien Bonaimé, Romuald Daniel et Arthur Delorme

Télépilotes - OVSM : Frédéric Jadélus, David Melezan et Cyril Vidal

Télépilotes - OVSG : David Jessop et Thierry Kitou

Télépilotes - OVPF : Christophe Brunet, Frédéric Lauret et Nicolas Villeneuve.

Les premiers tests d'équipements scientifiques embarqués se sont avérés prometteurs avec des essais réussis d'applications de photogrammétrie avec positionnement GPS décimétrique, de caméra thermique et optique ou encore de captation multispectrale 5 bandes.

For several years now, the use of drones for scientific research has been growing steadily, whether for specific observations or surveillance activities. This new technology thus opens up new perspectives, with regard to traditional field observations, for conducting research in many disciplines and in particular in several fields of study developed at the IPGP. In addition, these drones are a real tool for a future innovative and modern scientific communication.

The Drones Unit, led full-time by Sébastien Bonaimé, organises and pools these activities. Several drone pilots were trained and declared in 2020, in mainland France and in each of the overseas observatories, to carry out drone missions as part of various scientific projects :

Pilots-Paris: Sébastien Bonaimé, Romuald Daniel and Arthur Delorme

Pilots-OVSM: Frédéric Jadélus, David Melezan and Cyril Vidal

Pilots-OVSG: David Jessop and Thierry Kitou

Pilots-OVPF: Christophe Brunet, Frédéric Lauret and Nicolas Villeneuve.

The first tests of on-board scientific equipment proved promising with successful trials of photogrammetry applications with decimetric GPS position, thermal and optical cameras and 5-band multispectral capture.



Contact: drones@ipgp.fr



Vie de la recherche Research life



Projets européens EU projects

Eléonore Stutzmann, de l'équipe de sismologie, est bénéficiaire du projet ITN SPIN (Seismological Parameters and INstrumentation), coordonné par l'Université de Hambourg. SPIN est axé sur l'émergence de nouvelles technologies de détection sismique (câbles à fibre optique - DAS, grands réseaux N, détecteurs de rotation), leur intégration au sein des pratiques d'observation sismologique actuelles et la formation à la compréhension et à l'utilisation de ces nouveaux instruments.

Frédéric Moynier, de l'équipe de cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale, a obtenu une ERC Advanced Grant pour son projet METAL (Making tErresTriAn pLanets), qui vise à étudier les processus d'accrétion et de différenciation qui ont façonné la composition actuelle de la Terre, de la Lune, de Mars et des astéroïdes différenciés, mais aussi de comprendre l'origine de leurs éléments volatils et sidérophiles.

Marc Chaussidon, de l'équipe de cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale, est bénéficiaire du projet ChETEC-INFRA (Chemical Elements as Tracers of the Evolution of the Cosmos - Infrastructures for Nuclear Astrophysics), coordonné par le Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. Le but de ce projet est de mettre en réseau via un nouveau portail web intégré les laboratoires astronucléaires qui fournissent des données sur les réactions nucléaires, les superordinateurs qui effectuent des calculs sur la structure stellaire et la nucléosynthèse, et les télescopes et spectromètres de masse qui recueillent des données sur l'abondance des éléments et des isotopes.

Eléonore Stutzmann, from the Seismology team, is a beneficiary of the ITN project SPIN (Seismological Parameters and INstrumentation), coordinated by the University of Hamburg. SPIN focuses on the emergence of new seismic detection technologies (fibre optic cables - DAS, large N-arrays, rotation detectors), their integration into current seismological observation practices and training in the understanding and use of these new instruments.

Frédéric Moynier, from the Cosmochemistry, Astrophysics and Experimental Geophysics team, received an ERC Advanced Grant for his METAL project (Making tErresTriAn pLanets), which aims to study the accretion and differentiation processes that have shaped the current composition of the Earth, the Moon, Mars and differentiated asteroids, as well as to understand the origin of their volatile and siderophilic elements.

Marc Chaussidon, from the Cosmochemistry, Astrophysics and Experimental Geophysics team, is a beneficiary of the ChETEC-INFRA project (Chemical Elements as Tracers of the Evolution of the Cosmos - Infrastructures for Nuclear Astrophysics), coordinated by the Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. The aim of this project is to network through a new integrated web portal the astronucléaire laboratories that provide data on nuclear reactions, the supercomputers that perform calculations on stellar structure and nucleosynthesis, and the telescopes and mass spectrometers that collect data on the abundance of elements and isotopes.

Eric van Hullebusch, de l'équipe de biogéochimie à l'anthropocène des éléments et contaminants émergents, est porteur du projet ERA-NET Cofund on Raw Materials (ERA-MIN 2) BaCLEM (Bio-Assisted Closed Loop recycling of E-mobility Metals from waste PCBs and Li-ion batteries), en collaboration avec des partenaires turcs et belges. L'objectif de ce projet est d'extraire des métaux critiques à partir des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) tels que les circuits imprimés et les batteries Li-ion usagées, à l'aide d'une approche biohydrométallurgique innovante.

Eric van Hullebusch, from the Anthropocene Biogeochemistry of Emerging Elements and Contaminants team, is the project leader of the ERA-NET Cofund on Raw Materials (ERA-MIN 2) BaCLEM project (Bio-Assisted Closed Loop recycling of E-mobility Metals from waste PCBs and Li-ion batteries), in collaboration with Turkish and Belgian partners. The objective of this project is to extract critical metals from waste electrical and electronic equipment (WEEE) such as PCBs and used Li-ion batteries, using an innovative biohydrometallurgical approach.



Bourses Marie Skłodowska-Curie Marie Skłodowska-Curie Fellowships

Jean-Christophe Komorowski accueille Tomaso Esposti Ongaro en post-doctorat dans le cadre du projet PHEDRA (Phreatic Eruption Dynamics and Risk in the Antilles), qui vise à développer un nouveau modèle physique et numérique de simulation des éruptions phréatiques, pour l'appliquer ensuite à l'estimation de l'aléa et du risque volcaniques de la Soufrière de Guadeloupe.

Jean-Christophe Komorowski hosts Tomaso Esposti Ongaro as a post-doctoral fellow in the framework of the PHEDRA project (Phreatic Eruption Dynamics and Risk in the Antilles), which aims to develop a new physical and numerical model for the simulation of phreatic eruptions, and to apply it to the estimate of volcanic hazard and risk at La Soufrière de Guadeloupe.

Jérôme Gaillardet accueille le post-doctorant Jokubas Baronas pour le projet SIFFT (Solute Isotope Fractionation during Fluid Transit), dont le but est de mieux comprendre les liens entre l'évolution du climat et le processus d'altération chimique des roches silicatées, mécanisme essentiel du système terrestre qui fournit des nutriments aux écosystèmes et consomme du CO₂ atmosphérique.

Jérôme Gaillardet hosts Jokubas Baronas as a post-doctoral fellow for the SIFFT project (Solute Isotope Fractionation during Fluid Transit), which aims to better understand the links between climate change and the chemical weathering process of silicate rocks, a key mechanism in the Earth system that provides nutrients to ecosystems and consumes atmospheric CO₂.



Projets FEDER ERDF projects

HATARI, HAZard in TANzanian Rift

Le projet HATARI est un projet de recherche multidisciplinaire, collaboratif et innovant sur les aléas naturels associés à l'activité sismique et volcanique de l'archipel des Comores.

Coordination IPGP, porté par Andrea Di Muro à l'OVPF-IPGP.

HATARI, HAZard in TANzanian Rift

The HATARI project is a multidisciplinary, collaborative and innovative research project on natural hazards associated with seismic and volcanic activity in the Comoros archipelago.

Coordination IPGP, led by Andrea Di Muro at the OVPF-IPGP.



IMMERGE, Impact Multi-Environnemental des Retombées volcaniques et sahariennes en Guadeloupe

Le projet IMMERGE a pour objectif l'étude des retombées atmosphériques d'origine volcanique et saharienne, et l'évaluation de leur impact sur les multiples échelles environnementales du territoire guadeloupéen.

Coordination IPGP, porté par Céline Dessert à l'OVSG-IPGP.

IMMERGE, Multi-Environmental Impact of Volcanic and Saharan Deposition in Guadeloupe

The IMMERGE project aims to study atmospheric deposition of volcanic and Saharan origin, and to evaluate its impact on the multiple environmental scales of the Guadeloupean territory.

Coordination IPGP, led by Céline Dessert at the OVSG-IPGP.



Projets ANR
ANR projects

MIFS, Fractionnements isotopiques indépendants de la masse en cosmochimie

Le but de ce projet est d'explorer l'existence de fractionnements isotopiques indépendants de la masse (MIFs) pour des éléments clefs (Ti, Mo, Cr, Ni, O...) en couplant des approches théoriques et expérimentales en physique des plasmas pour simuler la nébuleuse protosolaire, avec des approches analytiques et de modélisation en cosmochimie et astrophysique. Si les MIFs sont ubiquistes dans ces plasmas, cela ouvrira une nouvelle fenêtre pour l'étude de la formation du Système solaire.

Coordination IPGP, porté par Marc Chaussidon de l'équipe de cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale.

MIFS, Mass-independent Isotopic Fractionations in cosmochemistry

The goal of this project is to explore mass-independent isotopic fractionations (MIFs) for key elements (Ti, Mo, Cr, Ni, O...) by coupling theory and experiments in plasma physics to simulate the protosolar nebula, with analyses and models in cosmochemistry and astrophysics. If MIFs are found ubiquitous in such plasmas, this will open a new window to study the early Solar System.

Coordination IPGP, led by Marc Chaussidon of the Cosmochemistry, Astrophysics and Experimental Geophysics team.

DISKBUILD, Processus de formation planétaire pendant l'assemblage de la nébuleuse solaire

L'objectif de ce projet est d'étudier l'afflux de matière au sein d'un disque protoplanétaire en cours d'assemblage et la façon dont il modifie le transport de la poussière, la formation de planétésimaux et la migration des planètes en utilisant une combinaison de modèles multi-échelles de pointe. DISKBUILD permettra de combler le fossé entre les planètes et le milieu interstellaire, d'offrir de nouvelles perspectives d'interprétation des données météoritiques et de mieux comprendre la manière dont les premiers solides du Système solaire se sont formés.

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

DISKBUILD, Early planetary formation processes during the assembling of the protoplanetary disk

The aim of this project is to investigate the material inflow onto an assembling protoplanetary disk and how this modifies the dust transport, planetesimal formation and planet migration using a combination of state-of-the-art multi-scale models. DISKBUILD will bridge the gap between planets and the interstellar medium to offer new perspective to interpret meteoritic data and to better understand how the first solids in the Solar System were formed.

Coordination IPGP, led by Sébastien Charnoz of the Cosmochemistry, Astrophysics and Experimental Geophysics team.

COLOSSE, Caractérisation des océans enfouis dans le Système solaire externe

Ce projet vise à lever le voile sur la dynamique des objets riches en eau du système solaire externe (Europe, Encelade) avant les prochaines missions spatiales (JUICE, Europa Clipper). À travers une double approche, expérimentale et numérique, COLOSSE étudiera l'écoulement et la dissipation au sein de l'océan et les conséquences sur la structure de la couche de glace de surface, accessible aux sondes spatiales.

Coordination CNRS, porté à l'IPGP par Thomas Gastine de l'équipe de géomagnétisme.

COLOSSE, Characterization of Ocean Layers in the Outer Solar System

This project aims to lift the veil on the dynamics of the water rich planetary bodies of the outer Solar System (Europa, Enceladus) prior to the coming space missions (JUICE, Europa Clipper). Through a dual approach, experimental and numerical, COLOSSE will study the flow and dissipation within the ocean and the consequences on the structure of the surface ice sheet, accessible to space probes.

CNRS coordination, led at the IPGP by Thomas Gastine of the Geomagnetism team.

ROYMAGE, horloge Optique à Ytterbium Mobile Appliquée à l'exploration GEodésique

Ce projet propose de construire une horloge optique à atomes d'ytterbium et d'explorer les applications de ce type d'instrument en géodésie et en géodynamique. La perspective de contrôler la fréquence de l'horloge, sensible au potentiel gravitationnel de la Terre engendré par les masses, avec 18 chiffres significatifs est désormais une réalité, ce qui se traduit par la possibilité de mesurer des différences d'altitude au cm près, ou des variations du géopotential à 0.1 m²s⁻² près. Cette mesure inédite mènera ainsi à des applications innovantes tant en géodésie opérationnelle qu'en sciences de la Terre.

Coordination CNRS, porté à l'IPGP par Guillaume Lion de l'équipe de géodésie.

ROYMAGE, Mobile Ytterbium Optical Clock Applied to Geodesic Exploration

This project proposes to build a transportable optical clock based on ytterbium atoms and to explore applications of this device to geodesy and geodynamics. The perspective of controlling the clock frequency, sensitive to the geopotential caused by mass distribution, at the level of 18 significant digits is now a reality, which opens the possibility of measuring height differences at the cm level, or equivalent geopotential variations at 0.1 m²s⁻². These unprecedented measurements will lead to disruptive applications in operational geodesy and in Earth Sciences.

CNRS coordination, led at the IPGP by Guillaume Lion of the Geodesy team.

NUTRILIFT, Racines profondes versus pompes : comparaison des prélèvements profonds de nutriments dans des éco- et agrosystèmes tropicaux secs

Le projet Nutrilift relève les défis de comprendre et quantifier le rôle de la remontée des nutriments dans le fonctionnement de la zone critique, en posant l'hypothèse que dans les forêts naturelles, les espèces à racines profondes peuvent tirer une partie de leurs ressources nutritives d'une altération minérale accrue en profondeur, et que l'importance de ce processus dans les agrosystèmes est moindre, les systèmes agroforestiers représentant une situation intermédiaire. En quantifiant l'impact du couplage/découplage de la « biosphère invisible et visible » sur les cycles des nutriments, le projet permettra de mieux évaluer la résilience des écosystèmes et de concevoir des pratiques de gestion plus durables stimulant les processus biologiques de la zone critique dans les agrosystèmes.

Coordination GET TOULOUSE, porté à l'IPGP par Jérôme Gaillardet de l'équipe de géochimie des enveloppes externes.

NUTRILIFT, Deep roots versus deep pumps: comparing deep nutrient uplift in dry tropical eco- and agro-systems

The Nutrilift project will take up the challenges of understanding and quantifying the role of nutrient lift in the functioning of the Critical Zone, guided by the hypothesis that while in natural forests, deep-rooted species can derive some of their nutrient resources from increased mineral weathering at depth. The relative importance of this process in agrosystems is much lesser, whereas agroforestry systems represent an intermediate situation. By quantifying the impact of coupling/découpling the "invisible and visible biosphere" on nutrient cycles, the project will allow a better assessment of ecosystem's resilience and to design more sustainable management practices enhancing biologically mediated Critical Zone processes in agrosystems.

GET TOULOUSE coordination, led at the IPGP by Jérôme Gaillardet of the External Envelope Geochemistry team.



Prix et distinctions Awards and honours



Manon Bickert

Géosciences marines / Marine Geosciences

Prix de thèse Ami Boué 2020 de la société géologique de France
Ami Boué 2020 PhD Thesis Award of the Geological Society of France



Léa Bonnefoy

Planétologie et sciences spatiales / Planetology and space sciences

Prix Jeunes Talents L'Oréal - UNESCO « Pour les Femmes et la Science »
L'Oréal - UNESCO Young Talent Award "For Women in Science"



Jordane Corbeau

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique /
Volcanological and seismological observatory of Martinique

Prix Jeunes Talents L'Oréal - UNESCO « Pour les Femmes et la Science »
L'Oréal - UNESCO Young Talent Award "For Women in Science"



Philippe Lognonné

Planétologie et sciences spatiales / Planetology and space sciences

Prix CNES Astrophysique et sciences spatiales de l'Académie des sciences
CNES Astrophysics and Space Sciences Prize of the Academy of Sciences



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences



Audrey Michaud-Dubuy

Tectonique et mécanique de la lithosphère / Lithosphere tectonics and mechanics

Prix de thèse CCR Cat Nat 2020
CCR Cat Nat 2020 PhD Thesis Award



Frédéric Moynier

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

**Grand Prix Madame Victor Noury, née Catherine Victoire Langlois -
Fondation de l'Institut de France de l'Académie des sciences**
"Madame Victor Noury, née Catherine Victoire Langlois - Fondation de
l'Institut de France" Grand Prize of the Academy of Sciences



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences



Kurama Okubo

Tectonique et mécanique de la lithosphère / Lithosphere tectonics and mechanics

Prix de thèse Géophysique 2020 du CNFGG
Geophysics 2020 PhD Thesis Award of the CNFGG





Nouveaux chercheurs et enseignants-chercheurs New researchers and professors



Lise Retailleau

Lise Retailleau obtient son doctorat en sciences de la Terre et de l'environnement à l'IPGP en 2015. Elle part ensuite en post-doctorat à l'ISTerre (Grenoble). En 2017, elle rejoint l'Université de Stanford (School of Earth) en Californie en tant que post-doctoral scholar. Elle intègre enfin l'IPGP en février 2020 en tant que post-doctorante à l'OVPF avant d'être nommée physicienne adjointe à l'IPGP en septembre 2020. Son travail se concentre sur l'analyse des signaux enregistrés par les réseaux sismologiques pour l'étude des sources allant de la sismicité volcano-tectonique à Mayotte aux cyclones tropicaux.

Lise Retailleau obtained her PhD in Earth and Environmental Sciences at the IPGP in 2015. She then went to ISTerre (Grenoble) for a post-doctorate. In 2017, she joined Stanford University (School of Earth) in California as a post-doctoral scholar. She finally joined the IPGP in February 2020 as a post-doctoral fellow at the OVPF before being appointed Assistant Physicist at the IPGP in September 2020. Her work focuses on the analysis of signals recorded by seismological networks for the study of sources ranging from volcano-tectonic seismicity in Mayotte to tropical cyclones.



Contact : retailleau@ipgp.fr



Élodie Lebas

Élodie Lebas obtient son doctorat en géophysique à l'IPGP en 2012. De 2013 à 2020, elle conduit sa recherche post-doctorale à Kiel en Allemagne, tout d'abord à l'institut GEOMAR (2013-2015) puis à l'université Christian-Albrecht (2015-2020). Elle effectue ensuite un post-doctorat à l'université de Lisbonne au Portugal, avant d'être recrutée en tant que physicienne adjointe dans l'équipe Géosciences marines de l'IPGP pour travailler sur la crise sismo-volcanique actuelle au large de Mayotte au sein du REVOSIMA (Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte). Ses travaux de recherche reposent sur l'analyse de données de géophysique marine afin de reconstruire l'histoire paléo-environnementale des bassins sédimentaires au large des îles volcaniques et en milieux lacustres, et d'identifier les processus géologiques et d'instabilités les affectant au cours du temps. Elle travaille également sur des études de téphrochronologie marine dans le but de reconstituer l'histoire éruptive passée des édifices volcaniques en domaine insulaire.

Élodie Lebas got her PhD in geophysics at the IPGP in 2012. From 2013 to 2020, she conducted her post-doctoral research in Kiel, Germany, first at the GEOMAR Institute (2013-2015) and then at the Christian-Albrecht University (2015-2020). She then did a post-doctorate at the University of Lisbon in Portugal, before being recruited as an Assistant Physicist in the Marine Geosciences team of the IPGP to work on the current seismo-volcanic crisis off Mayotte within the REVOSIMA (Volcanological and Seismological Monitoring Network of Mayotte). Her research is based on the analysis of marine geophysical data in order to reconstruct the paleo-environmental history of sedimentary basins off volcanic islands and in lacustrine settings, and to identify the geological and instabilities processes affecting them over time. She also reconstructs the past eruptive activity of oceanic volcanic islands through marine tephrochronology studies.



Contact : elebas@ipgp.fr



Cécile Prigent

Cécile Prigent obtient son doctorat en sciences de la Terre à l'ISTerre (Université Grenoble-Alpes) en 2017. Elle conduit ensuite trois ans de recherche post-doctorale à l'Université du Delaware (USA), avant d'être recrutée comme maîtresse de conférences à l'IPGP en 2020 dans l'équipe Géosciences marines. Ses recherches portent sur la rhéologie de la lithosphère aux interfaces de plaque, avec un intérêt particulier pour l'étude des mécanismes de rétroaction entre fluides et déformation des roches et de leurs conséquences sur les processus sismiques. Elle travaille principalement à partir de l'étude d'échantillons naturels en utilisant une démarche interdisciplinaire pétrologique, (micro)structurale et géochimique pour tracer la circulation des fluides et étudier les impacts des interactions fluide-roche sur le comportement mécanique des roches.



Contact : prigent@ipgp.fr

Cécile Prigent obtained her PhD in Earth Sciences at ISTerre (Université Grenoble-Alpes) in 2017. She then conducted three years of post-doctoral research at the University of Delaware (USA), before being recruited as an assistant professor at the IPGP in 2020 in the Marine Geosciences team. Her research focuses on the rheology of the lithosphere at plate interfaces, with a particular interest in constraining the feedback mechanisms between fluids and rock deformation and their consequences on seismic processes. She works mainly from the study of natural samples using an interdisciplinary petrological, (micro)structural and geochemical approach to trace the circulation of fluids and characterize the impacts of fluid-rock interactions on the mechanical behaviour of rocks.



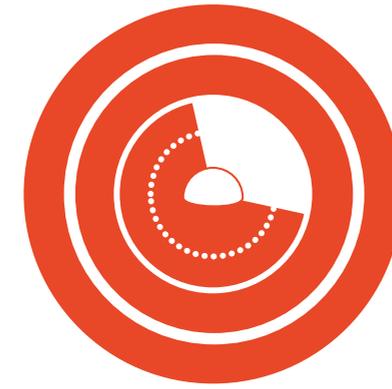
Guillaume Avice

Diplômé de l'École nationale supérieure de géologie de Nancy, Guillaume Avice obtient son doctorat en géosciences au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques de Nancy (CRPG, Université de Lorraine) en 2016. Il part ensuite travailler deux ans au California Institute of Technology (Caltech, USA) où il collabore avec les équipes du Jet Propulsion Laboratory (Caltech/NASA, USA) pour développer un spectromètre de masse miniaturisé pour les missions spatiales. Il intègre l'IPGP en 2018 en tant que chercheur post-doctoral (bourse DIM ACAV+) avant d'être recruté en 2020 comme chargé de recherche CNRS à l'IPGP. Il utilise les informations apportées par l'étude des abondances isotopiques des gaz rares et de l'azote dans des roches anciennes pour comprendre l'origine et l'évolution des atmosphères planétaires.

Graduate of the École Nationale Supérieure de Géologie (ENSG, Nancy), Guillaume Avice got his PhD in Geosciences in 2016 at the CRPG (Université de Lorraine, Nancy). He then took a post-doctoral scholar position at the California Institute of Technology (Caltech, USA) for two years where he collaborated with teams of the Jet Propulsion Laboratory (Caltech/NASA, USA) to develop a miniaturized mass spectrometer for space missions. He joined the IPGP in 2018 as a post-doctoral fellow before being recruited as "Chargé de Recherche CNRS" at the IPGP in 2020. He measures the elemental and isotopic compositions of noble gases and nitrogen in ancient rocks to understand the origin and evolution of planetary atmospheres.



Contact : avice@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 l'atterrisseur InSight transmet désormais les données sismiques de Mars. Ce thème revient notamment sur ce sujet cette année avec un focus sur les dernières mesures d'élasticité de la croûte superficielle de la planète rouge à partir des données d'InSight (Lognonné et al., 2020). Deux autres articles traitent quant à eux du magnétisme du noyau terrestre avec d'une part l'évaluation de la stratification du noyau par l'utilisation de simulations numériques de géomagnétisme (Gastine et al., 2020) et d'autre part la modélisation séquentielle de son champ magnétique (Ropp et al., 2020).

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 lander now transmits seismic data from Mars. This theme returns to this subject this year with a focus on the latest measurements of the elasticity of the shallow crust of the Red Planet from InSight data (Lognonné et al., 2020). Two other highlights deal with the magnetism of the Earth's core, with the evaluation of the core's stratification using numerical geomagnetic simulations (Gastine et al., 2020) and the sequential modelling of its magnetic field (Ropp et al., 2020).

#1

Évaluation de la stratification du noyau terrestre par géomagnétisme

Dynamo-based limit to the extent of a stable layer atop Earth's core

Les zones situées à l'interface entre les différentes enveloppes de la Terre sont des régions complexes dont la composition et la structure interne jouent un rôle déterminant dans la dynamique de notre planète.

La communauté scientifique s'accorde sur l'existence d'une zone de transition, appelée F-layer, à l'interface entre la graine et le noyau. En revanche, la question de la présence d'une stratification de la partie la plus externe du noyau, à la frontière avec le manteau à environ 2890 km de profondeur, est toujours vivement débattue. Les études sismologiques arrivent ainsi à des conclusions contradictoires : certaines révèlent une absence de stratification quand d'autres, à l'inverse, montrent une réduction de la vitesse des ondes sismiques dans une région allant de 140 à 300 km d'épaisseur. L'origine de cette couche reste par ailleurs incertaine : soit thermique, en étant reliée au flux de chaleur, soit compositionnelle, de par l'accumulation d'éléments légers dans la partie la plus externe du noyau.

De toute évidence, une telle stratification affecterait l'écoulement du fer liquide au sein du noyau. En effet, à l'intérieur d'une zone stratifiée, les mouvements radiaux sont fortement amortis et l'écoulement est dominé par des mouvements latéraux. Comme l'écoulement convectif est fortement corrélé au champ géomagnétique par effet dynamo, il est possible de contraindre le champ de vitesse grâce aux observations géomagnétiques. Cependant, la variation séculaire du champ magnétique terrestre (c'est-à-dire les variations temporelles du champ magnétique observées au cours des derniers siècles) ne permet pas à elle seule de contraindre une stratification éventuelle du noyau liquide.

Dans le but de quantifier l'effet physique d'une telle stratification de la partie externe du noyau, trois chercheurs de l'IPGP ont réalisé 70 modèles numériques de la géodynamo, en faisant varier l'épaisseur de la zone concernée et son degré de stratification. Ils ont ensuite quantifié l'accord morphologique entre le champ magnétique obtenu dans les modèles et le champ géomagnétique à la frontière noyau-manteau. Ces simulations ont permis d'établir une borne supérieure à l'épaisseur d'une éventuelle couche stratifiée. Le meilleur accord avec les données géomagnétiques a été obtenu en l'absence de stratification stable.

The boundaries between the main Earth's envelopes are complex regions and their internal structure and composition play a key role in the dynamics of our planet.

For the inner core-outer core boundary (ICB at ~5155 km depth) there is a general consensus on the existence of a transition zone, the so-called F-layer in Bullen's seismologically-based Earth's model. On the contrary, for the core-mantle boundary (CMB at ~2890 km depth) there is still a lively debate concerning a possible stratification atop the core. This is because seismic studies reached controversial conclusions: from evidence of no outermost core stratification, to evidence of a seismic velocity reduction within a layer that can be 140 km (and up to 300 km) thick. The origin of such a layer is also uncertain, either thermal, thus governed by the heat flux, or compositional due to the accumulation of light elements.

Clearly, a stratified outermost core would affect the flow of the liquid iron. More specifically, within the stably stratified layer, radial motion should be inhibited whereas lateral motion would prevail. Since core flow is strongly coupled to the geomagnetic field, via dynamo action, geomagnetic observations provide constraints on the core flow. Geomagnetic secular variation (i.e., variation of the magnetic field observed over the past several hundred years) is mainly governed by fluid flow at the top of the core, but data on secular variation alone cannot resolve whether or not the outermost core is stratified.

In order to quantify the effect of a stratified layer on the geodynamo, three scientists from the IPGP conducted 70 global geodynamo models varying the size and the degree of stratification atop the core. They then quantified the morphological agreement between the magnetic field obtained in the models and the geomagnetic field at the core-mantle boundary. Such comparison enables them to find an upper bound for the stable layer thickness and to conclude that geodynamo simulations strongly favor models with no stable stratification atop the core.

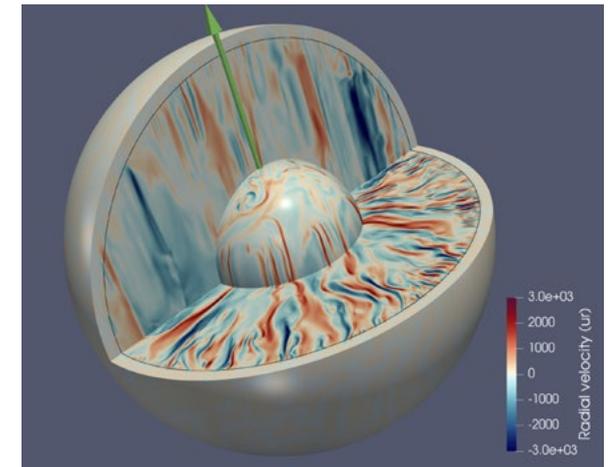
Représentation 3D de la composante radiale de la vitesse pour un modèle géodynamo. Les lignes en trait plein délimitent le rayon interne de la couche stratifiée, la flèche verte correspond à l'axe de rotation et la surface sphérique interne à $r = 0,39 r_0$.

3-D renderings of the radial velocity for a dynamo model. The solid lines delineates the radius of the stratified layer, the green arrow highlights the rotation axis and the inner spherical surface corresponds to $r = 0.39 r_0$.

© Gastine et al.



Ref : *Gastine T., Aubert J., Fournier A., Dynamo-based limit to the extent of a stable layer atop Earth's core, Geophysical Journal International, Volume 222, Issue 2, August 2020, Pages 1433–1448, DOI: 10.1093/gji/ggaa250*
Contact : gastine@ipgp.fr



#2

Mesures d'élasticité de la croûte superficielle de Mars à partir des données sismiques d'InSight

Constraints on the shallow elastic and anelastic structure of Mars from InSight seismic data

- **Novembre 2018 :** L'atterrisseur de la mission InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) se pose sur la planète Mars, dans une région baptisée Elysium Planitia.
- **Février 2019 :** Le sismomètre SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure) est complètement opérationnel.
- **Septembre 2019 :** 174 événements sismiques ont été enregistrés par SEIS, dont 20 d'origine tectonique de magnitude $M_w = 3-4$.
- **Mars 2020 :** Nature Geoscience publie une série de 4 articles sur « Mars insights from InSight », tous co-écrits par des chercheurs de l'IPGP.

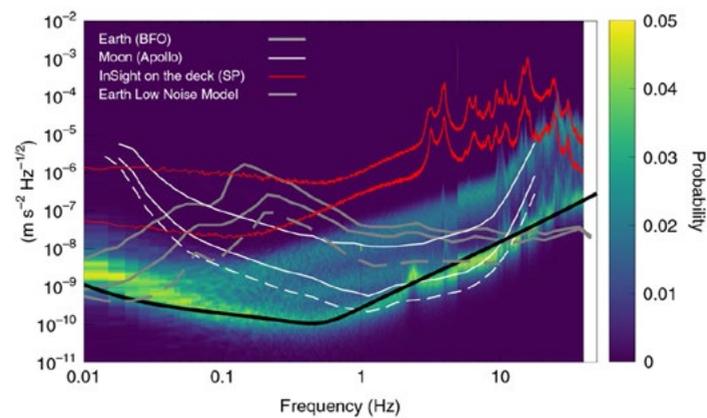
La mission InSight fournit les premiers enregistrements sismologiques in situ de l'intérieur de la planète Mars, avec un sismomètre sous responsabilité scientifique de l'IPGP. Cette mission a pour but de détecter, caractériser et localiser l'activité sismique de Mars, afin de déterminer la structure interne de la planète, sa composition et sa dynamique.

Dans l'un des articles parus dans Nature Geoscience, écrit par Philippe Lognonné et une équipe de chercheurs internationaux, les propriétés physiques de la croûte martienne sont révélées en utilisant un ensemble de signaux sismiques : trois séismes martiens, les

- **November 2018:** The InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) mission landed in Elysium Planitia on Mars.
- **February 2019:** The seismometer SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure) is fully deployed.
- **September 2019:** 174 seismic events have been recorded by SEIS, including over 20 events of tectonic origin with moment magnitude $M_w = 3-4$.
- **March 2020:** Nature Geoscience publishes a series of 4 articles about "Mars insights from InSight", all coauthored by IPGP researchers.

InSight provides the first direct geophysical in situ investigations of Mars's interior by seismology, with a seismometer lead by the IPGP. The InSight mission aims to detect, characterize and locate the seismic activity on Mars, in order to determine the planetary structure, composition and dynamics.

In one of the articles published in Nature Geoscience, written by Philippe Lognonné and a team of international researchers, properties of Mars crust beneath InSight are constrained by using a variety of signals: three Marsquakes, the ground deformations caused by atmospheric vortices, also called "dust devils", and the hammering of InSight's instrument HP³ (Heat Flow and Physical Properties).



Comparaison statistique des bruits sismiques martiens, terrestres et lunaires.
Statistical comparison of Martian, terrestrial and lunar seismic noise.
© Lognonné et al.

déformations du sol créées par des vortex atmosphériques, aussi appelés « dust devils », ou encore les vibrations engendrées par l'enfoncement de l'instrument HP³ (Heat Flow and Physical Properties) dans le sol martien.

Les trois « tremblements de Mars » présentent un rapport signal / bruit élevé, permettant d'une part d'utiliser la méthode de « fonction récepteur » (*receiver function*) pour déterminer les couches qui forment la croûte martienne et d'autre part de caractériser l'atténuation et la diffraction dans la croûte en utilisant une analyse de diffraction multiple (*multiscattering analysis*).

Les résultats obtenus par fonction récepteur révèlent ainsi que les premiers 8-11 km de la croûte martienne sont très altérés et/ou fracturés. L'analyse de l'atténuation et de la diffraction montre quant à elle que l'atténuation sismique sur Mars est trois fois plus importante que sur la Lune, suggérant que la croûte martienne contient très peu d'éléments volatils.

The three Marsquakes have a high signal-to-noise ratio, thereby enabling (i) to search for crustal layering using the receiver function method, (ii) to characterize attenuation and diffraction in the crust using multiscattering analysis.

The receiver function analysis shows that the uppermost 8-11 km of the Martian crust is highly altered and/or fractured, whereas measurements of the crustal diffusivity and attenuation, indicate that seismic attenuation is about three times larger than on the Moon, which suggests that Mars crust contains small amounts of volatiles.



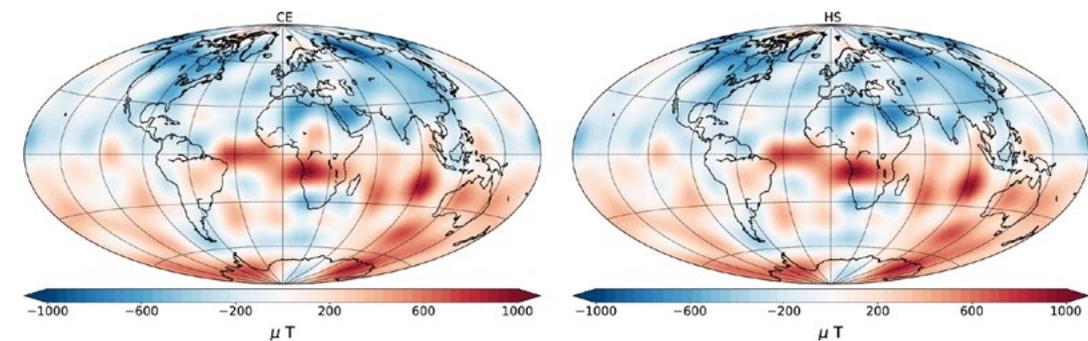
Ref : Lognonné P., Banerdt W.B., Pike W.T. et al. *Constraints on the shallow elastic and anelastic structure of Mars from InSight seismic data. Nat. Geosci. 13, 213–220 (2020).*
DOI: 10.1038/s41561-020-0536-y
(2020 WoS Hot paper in Field)
Contact : lognonne@ipgp.fr

#3

Modélisation séquentielle du champ magnétique du noyau terrestre Sequential modelling of the Earth's core magnetic field

Les mesures du champ magnétique terrestre, qu'elles soient réalisées par des satellites tels que ceux de la mission Swarm (ESA) ou par des observatoires au sol, proviennent à la fois de sources internes et externes. Le processus de convection qui se déroule à l'intérieur du noyau liquide de la Terre, la géodynamo, est le moteur principal du champ magnétique interne, tandis que des champs dits externes sont générés par des sources extérieures, notamment dans l'ionosphère et la

Measurements of the Earth's magnetic field, either by ground observatory or by magnetic satellite missions such as Swarm (ESA), include contributions from internal and external sources. The convective flow of liquid metal in the outer core - the geodynamo - is the main internal source and it generates the core field, whereas external sources (e.g., in the ionosphere and in the magnetosphere) generate the so-called external fields. The respective contributions of the different sources need to be separated



Carte de la composante radiale du champ du noyau, à la surface du noyau externe, à la date 2019.5.
Deux modèles sont présentés, utilisant différents types d'information préalable. Les modèles sont tronqués au degré harmonique 14.
Two models are presented, using different kinds of prior information. Models have been truncated at harmonic degree 14.
© Ropp et al.

magnétosphère. Ainsi, la distinction de ces différentes sources s'avère indispensable pour mieux comprendre la dynamique du noyau et réussir à prévoir les futures variations du champ magnétique de notre planète.

Des chercheurs de l'IPGP et leurs collègues proposent une nouvelle approche différente pour modéliser le champ du noyau et sa variation séculaire à haute résolution temporelle (de l'ordre de l'année). Une série temporelle de modèles est construite par une approche séquentielle reposant sur un filtre de Kalman, et une solide information préliminaire.

Cette information a priori fournit des données statistiques sur le comportement des sources modélisées et se doit par conséquent d'être physiquement pertinente. Elle est construite à partir des résultats de simulations numériques de la géodynamo, le « Coupled Earth model », effectuées par Julien Aubert.

Ce nouveau modèle fournit une excellente description du champ magnétique principal de la Terre ainsi qu'une estimation réaliste de sa variance. En outre, ce travail a contribué à la création de deux modèles indépendants, tous deux candidats à l'IGRF-13 (13^e édition de l'International Geomagnetic Reference Field) : celui de l'IPGP pour le champ principal 2020 et celui de l'équipe japonaise pour la prédiction des variations séculaires.

La contribution des chercheurs de l'IPGP à l'IGRF-13 est donc particulièrement importante, avec des contributions dans les trois tâches principales : la définition finale du champ magnétique en 2015, celle du champ magnétique en 2020, et la prévision de celui-ci dans les cinq ans à venir.

to better understand core dynamics, and to address the challenging task of forecasting time variations of the core magnetic field.

Researchers from the IPGP propose an original approach for the modelling of the core field and its secular variation with a high temporal resolution (~1 year). A time series of snapshot models is built through a sequential method based on a Kalman filter, and the use of a strong a priori information.

The prior provides statistical information on the behavior of the modelled sources, and therefore must be physically relevant. For the core field and secular variation, this prior information is derived from the outputs of a numerical dynamo experiment, namely the Coupled Earth model, provided by Julien Aubert.

This new model provides a good description of the main field, together with a realistic estimation of its variance. Moreover, their models have contributed to set two independent candidates to the International Geomagnetic Reference Field (IGRF): the IPGP candidate to the IGRF-13 main field 2020, and the Japanese team candidate to the IGRF-13 predictive secular variation.

Last, but not least, in 2020 the contribution of IPGP researchers to the 13th edition of the International Geomagnetic Reference Field has been important, since the IPGP contributed to each of the three main tasks: define a final mapping on the magnetic field in 2015, define its present state in 2020 and forecast its evolution over the next five years.



Ref : Ropp G., Lesur V., Baerenzung J. et al. *Sequential modelling of the Earth's core magnetic field. Earth Planets Space 72, 153 (2020).* DOI: 10.1186/s40623-020-01230-1
Contact : ropp@ipgp.fr



Risques naturels Natural hazards

Comprendre l'origine et le fonctionnement des éruptions volcaniques, des tremblements de terre, des tsunamis, des glissements de terrain ou encore des orages magnétiques constitue un enjeu majeur pour appréhender les aléas et risques associés. Ces phénomènes naturels demeurent le résultat de processus géologiques se produisant sur des échelles de temps et d'espace variées, dont l'analyse englobe la quasi-totalité des spécialités des sciences de la Terre. Leur étude à l'IPGP combine des approches de terrain (observations et mesures continues ou ponctuelles, en observatoire, lors de campagnes en mer, etc.), des observations depuis l'espace, des études et analyses d'échantillons en laboratoire, ainsi que des modélisations théoriques. Cette édition 2020 du rapport annuel met plus particulièrement en avant des résultats obtenus par des modélisations numériques (Menant et al., 2020), expérimentales (Michaud-Dubuy et al., 2020) ou dans le cadre de développements instrumentaux (Feron et al., 2020).

Understanding the origin and functioning of volcanic eruptions, earthquakes, tsunamis, landslides and magnetic storms is a major challenge for understanding the associated hazards and risks. These natural phenomena are the result of geological processes occurring on various time and space scales, and their analysis covers almost all the branches of the Earth sciences. Their study at the IPGP combines field approaches (continuous or punctual observations and measurements, in observatories, during sea campaigns, etc.), observations from space, laboratory studies and analyses of samples, as well as theoretical modelling. This 2020 edition of the annual report highlights results obtained through numerical modelling (Menant et al., 2020), experimental modelling (Michaud-Dubuy et al., 2020) or instrumental developments (Feron et al., 2020).



Un sismomètre optique à l'épreuve de la Soufrière de Guadeloupe An optical seismometer tested on La Soufrière in Guadeloupe

Le suivi et l'analyse des instabilités mécaniques menant à des crises telluriques (séismes, éruptions volcaniques, glissements de terrain, etc.) requièrent des instrumentations installées le plus près possible des sources sismiques, afin de mieux comprendre le détail de leur dynamique et de détecter d'éventuels signaux précurseurs. Souvent localisées dans des environnements inhospitaliers, présentant des risques élevés pour les capteurs et pour les opérateurs, ces installations s'avèrent généralement très coûteuses. C'est la raison pour laquelle l'IPGP s'est associé à la grande école d'ingénieurs ESEO, dans le cadre d'un partenariat R&D, pour développer depuis près de 10 ans de nouvelles instrumentations géophysiques optiques sur fibre plurikilométrique. Celles-ci permettront de réduire notablement les risques et les coûts de certains sites instrumentés.

Ainsi, pour la première fois, un sismomètre optique pilote a été mis en place avec succès en octobre 2019 au sommet du dôme de la Soufrière de Guadeloupe. Plus d'un kilomètre de fibre optique a été déroulé sur les pentes du volcan, depuis sa base jusqu'aux fumarolles actives de son sommet, avec la présence à l'extrémité du câble d'un capteur sismométrique optique original. Connecté en continu et en temps réel sur le réseau téléphonique, l'appareil est toujours en fonctionnement aujourd'hui. C'est la première fois qu'un sismomètre survit aussi longtemps dans l'atmosphère hostile du sommet et de ses effluves d'acide sulfurique, sans avoir besoin d'intervention humaine pour reprendre les mesures, changer les batteries, vérifier l'état des câbles et connecteurs ou changer de numériseur. En effet, ces capteurs optiques ne nécessitent en principe aucune maintenance car ils sont dépourvus de tout élément électronique ou électrique susceptible de tomber en panne. Ces atouts pourraient être précieux en cas de forte augmentation de l'activité fumarolienne excluant toute possibilité d'intervention sur place.

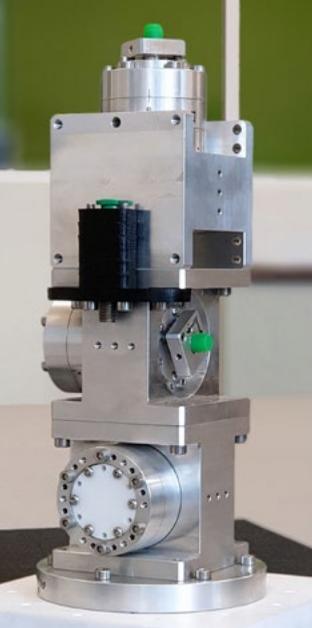
L'objectif de cette installation était double : technologique, avec la mise à l'épreuve réussie du capteur en milieu acide et le test de ses performances métrologiques (lesquelles se sont révélées excellentes, semblables à celles des géophones commerciaux de même type les

The monitoring and analysis of mechanical instabilities leading to telluric crises (earthquakes, volcanic eruptions, landslides, etc.) require instruments to be installed as close as possible to the seismic sources in order to better understand the details of their dynamics and to detect possible precursor signals. Often located in inhospitable environments, with high risks for sensors and operators, these installations are usually very costly. This is the reason why the IPGP has been working for nearly 10 years now with the engineering school ESEO, within the framework of an R&D partnership, to develop new geophysical instruments on multi-kilometer optical fiber. These will make it possible to significantly reduce the risks and costs of certain instrumented sites.

Thus, for the first time, a pilot optical seismometer was successfully installed in October 2019 at the top of La Soufrière dome in Guadeloupe. More than a kilometer of optical fiber was unwound on the slopes of the volcano, from its base to the active fumaroles at its summit, with an original optical seismic sensor at the end of the cable. Connected continuously and in real time to the telephone network, the device is still in operation today. This is the first time that a seismometer has survived for so long in the hostile atmosphere of the summit and its sulfuric acid fumes, without the need for human intervention to take new measurements, change batteries, check the condition of cables and connectors or change digitizers. These optical sensors are essentially maintenance-free as they have no electronic or electrical components that could fail. This could be valuable in the event of a surge in fumarole activity that precludes the possibility of on-site intervention.

The objective of this installation was twofold: technological, with the successful testing of the sensor in an acidic environment and the testing of its metrological performance (which proved to be excellent, similar to that of the best performing commercial geophones of the same type, and even better at low frequencies), and scientific, through its close-up measurements of the seismic noise generated by fumaroles.

This noise shows several spectral lines with varying intensity and frequency over time, certainly related to the



plus performants, voire meilleures à basse fréquence), mais également scientifique, à travers ses mesures rapprochées du bruit sismique généré par les fumarolles.

Ce bruit montre ainsi plusieurs raies spectrales, dont l'intensité et la fréquence varient avec le temps, certainement liées aux variations de pression et de volume des sources de ces fumarolles au sein du dôme. Afin de mieux cerner l'origine de ces fluctuations, celles-ci doivent encore être corrélées avec d'autres paramètres tels que la sismicité, les déformations, la température des gaz, etc., puis comparées avec les variations détectées par les autres sismomètres du réseau à flanc de volcan. A l'avenir, il faudra dater plus précisément sur le sismomètre optique l'arrivée des premières ondes sismiques et des essaims de microséismes au sein du dôme, plus fréquents depuis quelques années, pour mieux comprendre leur localisation et leur origine.

Le prochain instrument analogue sera installé en juin 2021, au bout de 5 km de câble optique sous-marin et ensouillé par 45 m de fond, dans le but de surveiller l'activité sismique de l'archipel des Saintes. A plus long terme, ces sismomètres optiques devraient équiper le futur observatoire volcanologique sous-marin câblé de Mayotte (REVOSIMA).

Installation et mesures du sismomètre optique de la Soufrière, avec ses trois composantes assemblées avant montage dans l'enceinte de Téflon, pour le protéger contre l'acidité du milieu.

Installation and measurements of La Soufrière optical seismometer, with its three components assembled before mounting in the Teflon enclosure, to protect it from the acidity of the environment.

© IPGP

variations of pressure and volume of the sources of these fumaroles within the dome. In order to better understand the origin of these fluctuations, they still need to be correlated with other parameters such as seismicity, deformations, gas temperature, etc., and then compared with the variations detected by the other seismometers of the volcano-side network. In the future, it will be necessary to date the arrival of the first seismic waves and the swarms of microearthquakes within the dome (which have become more frequent in recent years) more precisely on the optical seismometer, in order to better understand their location and origin.

The next similar instrument will be installed in June 2021, at the end of 5 km of undersea optical cable and sunk in 45 m of water, in order to monitor the seismic activity of the Saintes archipelago. In the longer term, these optical seismometers should equip the future cabled underwater volcanological observatory of Mayotte (REVOSIMA).



Ref : Bernard P., Feron R., Plantier G., Nercessian A., Couteau J., Sourice A., Feuilloz M., Cattoen M., Seat H.C., Chawah P., Chéry J. & Brunet C. Onland and Offshore Extrinsic Fabry-Perot Optical Seismometer at the End of a Long Fiber, *Seismological Research Letters* 90 (6): 2205–221. DOI: 10.1785/0220190049

Feron R., Bernard P., Feuilloz M., Ménard P., Nercessian A., Deroussi S., Kitou T. & Plantier G. First optical seismometer at the top of La Soufrière volcano, Guadeloupe, *Seismol. Res. Lett.*, 91, 2020, DOI: 10.1785/0220200126

Contact : bernard@ipgp.fr

#2

Le bruit sismique mondial réduit de moitié suite à la pandémie de COVID-19

Global seismic noise cut in half as a result of the COVID-19 pandemic

Une étude publiée dans la revue Science impliquant 76 sismologues internationaux de 66 institutions dans 27 pays, révèle que les mesures de confinement prises pour lutter contre la propagation du COVID-19 ont entraîné une réduction de 50% du bruit sismique haute fréquence (entre 4 et 14 Hz) observé à l'échelle mondiale en 2020. Ce bruit, qui affecte principalement la surface de la Terre, est de nature anthropique, c'est à dire généré par les activités humaines.

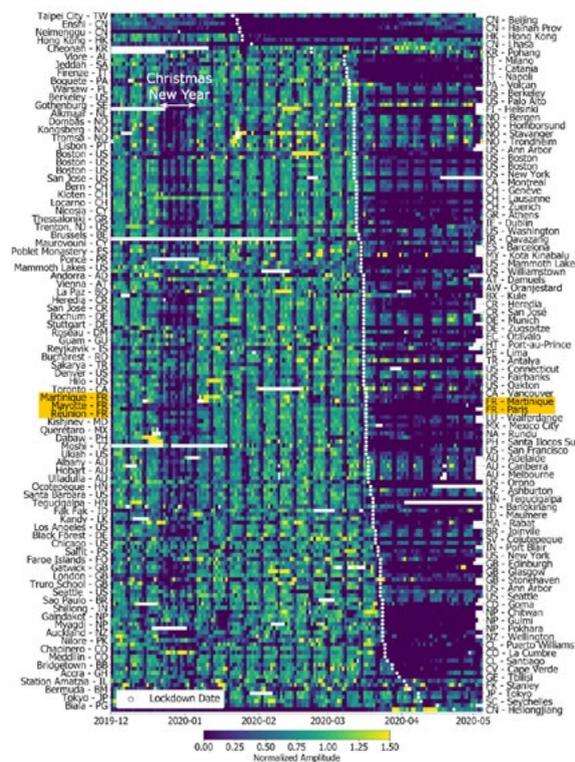
En analysant les données de milliers de stations sismiques sur la planète, issues de réseaux de surveillance de pointe mais aussi de capteurs sismiques citoyens installés par des particuliers ou dans des écoles, les chercheurs montrent que cette diminution du bruit sismique dans de nombreux pays et régions permet de visualiser une « vague » de confinement partant de Chine.

Deux chercheurs de l'IPGP ont contribué à cette publication en analysant les données du sismomètre CURIE, situé dans le sous-sol de l'IPGP à Paris, ainsi que d'autres stations sismologiques françaises sur les îles de Mayotte, La Réunion et la Martinique.

A study published in the journal Science involving 76 international seismologists from 66 institutions in 27 countries revealed that lockdown measures implemented to control the spread of COVID-19 resulted in a 50% decrease in the high-frequency seismic noise (between 4 and 14 Hz) observed globally in 2020. This noise, which mainly affects the Earth's surface, is anthropogenic, i.e. generated by human activities.

By analyzing data from thousands of seismic stations around the world, from state-of-the-art monitoring networks as well as from citizen seismic sensors installed by individuals or in schools, the researchers showed that this decrease in seismic noise in many countries and regions made it possible to visualize a "wave" of lockdown starting in China.

Two IPGP researchers contributed to this publication by analyzing data from the CURIE seismometer, located in the basement of the IPGP in Paris, as well as from other French seismological stations on the islands of Mayotte, La Réunion and Martinique.



Visualisation de la baisse du bruit sismique au fur et à mesure de l'entrée en vigueur de mesures de confinement dans le monde. En jaune les stations traitées par les scientifiques de l'IPGP. Visualization of the decrease in seismic noise as lockdown measures were implemented around the world. The stations analyzed by the IPGP scientists appear in yellow.

© Lecocq et al.

A l'avenir, l'analyse des enregistrements sismiques réalisés pendant les périodes de confinement pourrait permettre de détecter de nouveaux types de signaux sismiques habituellement « masqués » au sein du bruit sismique anthropique et fournir ainsi de nouvelles données sur les séismes et les volcans notamment. En outre, en établissant une corrélation avec les données de mobilité humaine issues des applications de cartographie, les données sismiques recueillies pourraient également être utilisées comme un indicateur indirect de l'activité humaine en temps quasi réel. Cela permettrait par exemple de mesurer l'adhésion aux mesures de confinement sans avoir recours à l'utilisation de données personnelles.



Ref : Lecocq T., Hicks S., Van Noten K., Van Wijk K., Koelemeijer P., et al. Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures. *Science* 11 Sep 2020: Vol. 369, Issue 6509, pp. 1338-1343. DOI: 10.1126/science.abd2438

Contact : retailleau@ipgp.fr / satriano@ipgp.fr

#3

Un soulèvement périodique du domaine côtier à l'aplomb des zones de subduction

Periodic uplift of the coastal area over subduction zones

La topographie dans les zones de subduction est communément vue comme la conséquence de processus tectoniques se produisant à l'interface des plaques où ont lieu les méga-séismes tels que ceux de Sumatra (2004) et de Tohoku (2011). La bonne compréhension des relations entre ces processus profonds et la réponse topographique en surface est donc cruciale, notamment du fait de la densité de population que peuvent connaître les domaines côtiers à l'aplomb de ces zones de subduction (ex. Japon, Chili, Indonésie).

Grâce à des techniques de modélisation numérique thermo-mécanique avancées, une équipe menée par des chercheurs de l'IPGP montre que l'empilement de fragments de croûte océanique (comprenant les sédiments du plancher océanique ainsi que la croûte basaltique) à la base de la croûte de la plaque supérieure permet d'expliquer la topographie côtière observée le long des marges de subduction. En particulier, ce phénomène a pour conséquence la formation d'oscillations verticales en surface, à l'aplomb du prisme d'accrétion profond. Celles-ci présentent des amplitudes de plusieurs centaines de mètres et une périodicité de quelques millions d'années, comme si la surface au-dessus des subductions en régime d'accrétion « respirait » de manière lente et régulière.

In the future, the analysis of seismic recordings taken during lockdown periods could allow the detection of new types of seismic signals that are usually "masked" under anthropogenic seismic noise and thus provide new data on earthquakes and volcanoes in particular. In addition, by correlating with human mobility data from mapping applications, the seismic data collected could also be used as a proxy for human activity in near-real time. This would allow, for example, the measurement of adherence to lockdown measures without the use of personal data.

Topography in subduction zones is commonly seen as a result of tectonic processes occurring at the plate interface where megathrust earthquakes such as Sumatra (2004) and Tohoku (2011) take place. A good understanding of the relationship between these deep processes and the surface topographic response is therefore crucial, especially due to the population density that can occur in coastal areas over these subduction zones (e.g. Japan, Chile, Indonesia).

Using advanced thermo-mechanical numerical modeling techniques, a team led by IPGP researchers has shown that the stacking of oceanic crust fragments (including seafloor sediment as well as basaltic crust) at the base of the crust of the upper plate helps explain the coastal topography observed along subduction margins. In particular, this phenomenon results in the formation of vertical oscillations at the surface, just over the deep accretionary prism. These oscillations have amplitudes of several hundred meters and a periodicity of a few million years, as if the surface above the accreting subductions were "breathing" in a slow and regular manner.

This "long-term" periodic signal is virtually undetectable on the time scales of the methods commonly used

Ce signal périodique « long-terme » est pratiquement indétectable aux échelles de temps des méthodes couramment utilisées pour mesurer ces mouvements verticaux, telles que les approches géodésiques (ex. GPS, InSAR - à l'échelle de quelques années ou quelques décennies) ou l'étude des terrasses marines soulevées (à l'échelle de quelques centaines de milliers d'années). En outre, il est hautement probable que ce signal vienne se superposer aux mouvements verticaux « court-terme » générés pendant le cycle sismique. Cette étude pointe ainsi les signaux à rechercher dans le futur et leur échelle spatio-temporelle, afin de mettre en évidence les oscillations verticales modélisées.

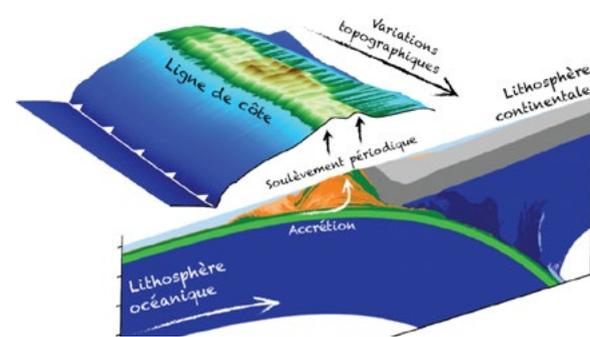
Ces résultats soulignent donc l'importance d'étudier les variations topographiques le long des marges actives afin d'identifier ces épisodes d'accrétion, qui peuvent à la fois aider à mieux interpréter les déplacements verticaux de la croûte le long des marges en subduction, mais aussi permettre à terme de mieux contraindre les propriétés frictionnelles le long du plan de subduction.



Ref : Menant A., Angiboust S., Gerya T., Lacassin R., Simoes M. & Grandin R., *Transient stripping of subducting slabs controls periodic forearc uplift.*, *Nature Communications* (2020), DOI: 10.1038/s41467-020-15580-7
Contact : angiboust@ipgp.fr

to measure these vertical motions, such as geodetic approaches (e.g. GPS, InSAR - on the scale of a few years or decades) or the study of uplifted marine terraces (on the scale of a few hundred thousand years). Furthermore, it is highly likely that this signal is superimposed on the "short-term" vertical motions generated during the seismic cycle. This study thus highlights the signals to look for in the future and their space-time scale, in order to identify the vertical oscillations modelled.

These results underscore the importance of studying topographic variations along active margins in order to identify these accretion events, which can help to better interpret vertical crust displacements along subduction margins, and ultimately make it possible to more accurately map frictional properties along the subduction plane.



Bloc synthétisant les résultats de modèles numériques de subduction qui prédisent un soulèvement périodique du domaine côtier en réponse à l'accrétion profonde de lambeaux de croûte océanique le long du plan de subduction.

Block diagram summarizing the results of numerical subduction models that predict periodic uplift of the coastal area in response to deep accretion of oceanic crust slivers along the subduction plane.

© Menant et al.

#4

La dangerosité des panaches volcaniques explosifs atténuée par des vents violents

Danger of explosive volcanic plumes mitigated by strong winds

Les éruptions volcaniques explosives sont parmi les phénomènes naturels les plus violents sur Terre et peuvent causer une grande variété de dommages, allant de difficultés respiratoires dues à l'émission de gaz volcaniques et de cendres fines, à de très lourdes pertes en vies humaines lorsque des coulées pyroclastiques dévalent les flancs du volcan. Les événements volcaniques les plus puissants sont caractérisés par la formation d'un panache plinien (du nom de Pline le Jeune qui fut le premier à décrire ce phénomène lors de l'éruption du Vésuve de 79), qui peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude dans l'atmosphère et disperser des cendres à plusieurs milliers de kilomètres de l'événement. Il arrive fréquemment que ce panache s'effondre sous son propre poids en cours d'éruption et génère des

Explosive volcanic eruptions are among the most violent natural phenomena on Earth and can cause a wide range of damage, from breathing difficulties due to the emission of volcanic gases and fine ash, to very heavy loss of life when pyroclastic flows run down the sides of the volcano. The most powerful volcanic events are characterized by the formation of a Plinian plume (named after Pliny the Younger who first described this phenomenon during the eruption of Vesuvius in 79 AD), which can ascend several tens of kilometers into the atmosphere and disperse ash several thousand kilometers from the vent. This plume frequently collapses under its own weight during an eruption, creating devastating and potentially deadly pyroclastic flows. Quantitative determination of the conditions leading to such a collapse is therefore a crucial issue



2 cm

Dispositif expérimental en laboratoire et photographie d'une expérience illustrant l'effet du vent sur la dynamique d'un panache turbulent. Laboratory experimental setup and photograph of an experiment illustrating the effect of wind on the dynamics of a turbulent plume.

© IPGP

coulées pyroclastiques dévastatrices et potentiellement meurtrières. La détermination quantitative des conditions menant à un tel effondrement est donc un enjeu crucial pour l'évaluation de l'aléa volcanique en cas de crise éruptive.

Les vents atmosphériques jouent un rôle important dans l'évolution d'un panache volcanique en contrôlant sa trajectoire et la direction principale de dispersion des produits éruptifs. L'effet du vent sur sa stabilité est en revanche mal connu, limitant notre capacité à prédire un effondrement de panache. Une équipe de recherche de l'IPGP a ainsi reproduit ce phénomène en laboratoire à l'aide d'un dispositif expérimental mis à l'échelle. Celui-ci permet de générer un panache turbulent soumis à l'action du vent en conditions contrôlées et de comparer les résultats expérimentaux à de nouvelles solutions analytiques proposant un critère d'effondrement, ainsi qu'aux prédictions d'un modèle physique de panache volcanique développé à l'IPGP.

Les résultats de ces expériences montrent que le vent stabilise largement le panache et l'empêche de s'effondrer. Ils sont en bon accord avec les solutions analytiques et permettent de mieux contraindre le modèle physique de panache volcanique dont les prédictions peuvent être utilisées rapidement pour évaluer les zones potentiellement à risques lors d'une éruption volcanique explosive. La comparaison de ces prédictions théoriques aux données des éruptions historiques du Mt Pinatubo (une des plus puissantes du XX^e siècle) et du Mont Hudson en 1991 révèle que le nouveau critère d'effondrement capture très bien le comportement de ces panaches volcaniques. En empêchant ou en retardant la déstabilisation du panache et la production de coulées pyroclastiques, les vents forts ont probablement sauvé des milliers de vies lors de ces deux événements majeurs.

for assessing volcanic hazard in the event of an eruptive crisis.

Atmospheric winds play an important role in the evolution of a volcanic plume by controlling its trajectory and the main direction of dispersion of eruptive products. However, the effect of the wind on its stability is poorly understood, limiting our ability to predict a plume collapse. A research team from the IPGP has thus reproduced this phenomenon in the laboratory using a scaled experimental setup. This setup makes it possible to generate a turbulent plume submitted to the action of the wind under controlled conditions and compare the experimental results to new analytical solutions proposing a collapse criterion, as well as to the predictions of a physical model of volcanic plumes developed at the IPGP.

The results of these experiments show that the wind largely stabilizes the plume and prevents it from collapsing. They are consistent with the analytical solutions and make it possible to better constrain the physical model of volcanic plumes, the predictions of which can be used quickly to assess potential risk areas during an explosive volcanic eruption. Comparison of these theoretical predictions with data from the historical eruptions of Mount Pinatubo (one of the most powerful eruptions of the 20th century) and Mount Hudson in 1991 reveals that the new collapse criterion captures the behavior of these volcanic plumes very well. By preventing or delaying plume destabilization and the production of pyroclastic flows, strong winds probably saved thousands of lives in these two major events.



Ref : Michaud-Dubuy A., Carazzo G. & Kaminski E., *Wind entrainment in jets with reversing buoyancy: Implications for volcanic plumes.* *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2020JB020136. DOI: 10.1029/2020JB020136
Contact : michaudubuy@ipgp.fr



Système Terre Earth system science

Le thème Système Terre s'attache à comprendre les interactions entre les enveloppes externes de notre planète (lithosphère, hydrosphère, biosphère et atmosphère) et par extension des planètes du système solaire. Sur Terre, les organismes vivants, l'air, l'eau et la roche interagissent de façon complexe. Théâtre de transformations chimiques, de réactions biologiques et de flux d'énergie et de matière, ces milieux jouent un rôle environnemental majeur dans l'évolution des surfaces. 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. Cette année, le thème Système Terre met en avant de nouveaux développements dans le domaine des archives paléo-environnementales (Thaler et al., 2020), des mécanismes de bio-minéralisation (Couasnon et al., 2020), de la modélisation de la dynamique des paysages (Daudon et al., 2020), ainsi que des applications des outils isotopiques à la médecine (Moynier et al., 2020).

The Earth System Science theme focuses on understanding the interaction between the outer layers of our planet (lithosphere, hydrosphere, biosphere and atmosphere) and by extension the planets of the solar system. On Earth, living organisms, air, water and rock interact in complex ways. Resulting from chemical transformations, biological reactions, and fluxes of energy and matter, these media play a major environmental role in the evolution of surfaces. They include the critical zone, the outermost layer of our planet, which extends from the base of aquifers to the top of the atmospheric boundary layer. By concentrating most human activities, the critical zone is subject to rapid and profound changes affecting living organisms and their environment. This year, the Earth System Science theme highlights new developments in the field of paleo-environmental archives (Thaler et al., 2020), bio-mineralization mechanisms (Couasnon et al., 2020), landscape dynamics modelling (Daudon et al., 2020), as well as applications of isotope tools to medicine (Moynier et al., 2020).

#1

Premières observations *in situ* de mécanismes de biominéralisation des métaux à l'échelle de la cellule bactérienne

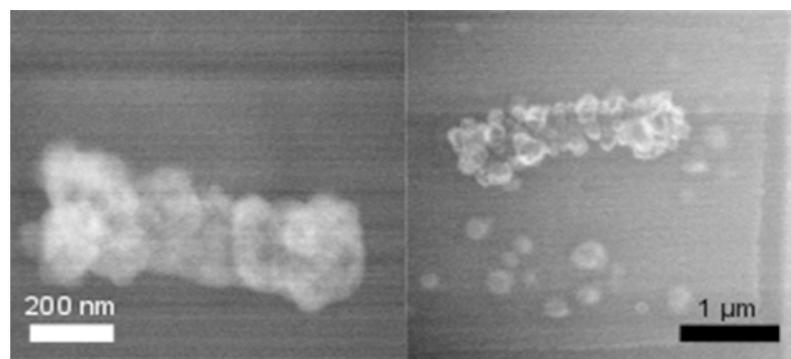
First *in situ* observations of metal biomineralization mechanisms at the bacterial cell level

La biominéralisation induite par les bactéries est un processus environnemental majeur qui contrôle l'immobilisation, le transport, la spéciation et même la toxicité des métaux(-alloïdes). Il constitue donc un mécanisme critique qui régit le cycle du métal(loïde) sur Terre, de la zone critique à plusieurs kilomètres sous la surface du sol.

Des chercheurs de l'IPGP et du laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques (Université de Paris, CNRS) ont pour la première fois réussi à caractériser, en milieu liquide et à l'échelle nanométrique, l'influence des cellules bactériennes et des polymères organiques qu'elles sécrètent sur la formation d'un minéral. En tirant parti des avancées récentes en microscopie électronique en transmission en phase liquide, ils ont montré que la nucléation et la croissance du minéral dépendaient étroitement de la nature et de la distribution des groupes fonctionnels au sein de ces structures organiques, qui conditionnent *in fine* la morphologie, la taille et la localisation du minéral.

Biomineralization driven by bacteria is a major environmental process that controls immobilization, transport, speciation, and even toxicity of metal(loïd)s. Hence, it constitutes a critical mechanism that governs metal(loïd)s cycling on Earth, from the critical zone to several kilometers below the ground's surface.

Researchers from the IPGP and the "Quantum Materials and Phenomena" Laboratory (Université de Paris, CNRS) have for the first time characterized, in a liquid medium and at the nanometric scale, the influence of bacterial cells and the organic polymers they secrete on the formation of a mineral. By taking advantage of recent advances in transmission electron microscopy in liquid media, the team showed that the nucleation and growth of the mineral closely depends on the nature and distribution of functional groups within these organic structures, which ultimately condition the morphology, size, and location of the mineral.



Clichés de microscopie électronique en transmission en phase liquide de souches mutantes d'*Escherichia coli* sécrétant différents types de polymères organiques sur lesquels s'initie de manière différentielle la précipitation du manganèse.

Liquid-cell scanning transmission electron microscopy images of mutant *Escherichia coli* strains secreting different types of organic polymers on which manganese precipitation is differently initiated.

© IPGP/MPQ

De telles approches *in situ* à l'échelle cellulaire ouvrent des voies nouvelles pour l'étude des processus de biominéralisation, c'est-à-dire de synthèse de minéraux par le vivant, et des mécanismes régissant le comportement des métaux au sein des biofilms microbiens. Ces derniers, qui représentent le mode préférentiel d'organisation des microorganismes dans l'environnement, pourraient jouer un rôle majeur mais encore méconnu dans le cycle des métaux dans la zone critique.

Such *in situ* approaches at the cellular scale open new ways to study biomineralization processes, that is, the synthesis of minerals by living organisms, and the mechanisms that govern the behavior of metals within microbial biofilms. The latter, which represent the preferred mode of organization of microorganisms in the environment, may play a major but yet unknown role in metal cycling in the critical zone.



Ref : Couasnon T., Alloyeau D., Ménez B., Guyot F., Ghigo J.M. & Gélabert A., *In situ monitoring of exopolymer-dependent Mn mineralization on bacterial surfaces*, *Science Advances*, 6(27):eaaz3125, 2020.

DOI: 10.1126/sciadv.aaz3125

Contact : gelabert@ipgp.fr

#2

Une nouvelle approche numérique pour l'étude des vallées fluviales de méthane liquide sur Titan

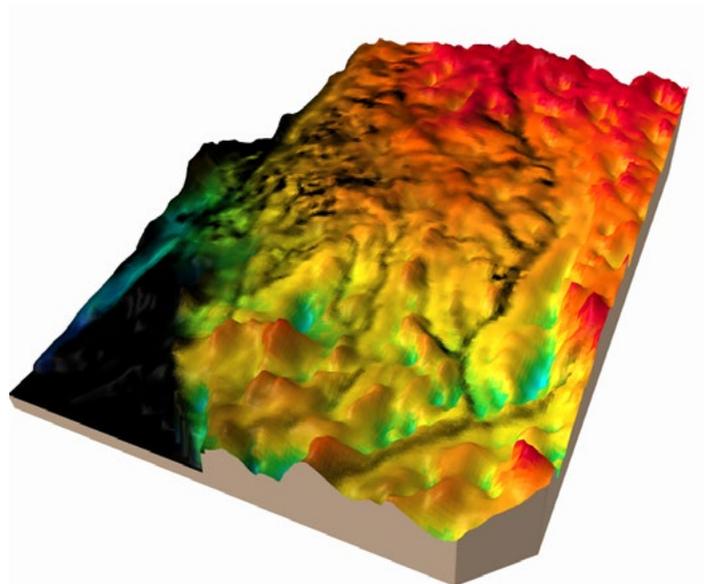
A new numerical approach for the study of liquid methane river valleys on Titan

La mission Cassini-Huygens, qui s'est achevée le 15 septembre 2017 après 7 ans de voyage et 13 ans de service, a permis de nombreuses découvertes sur Saturne, ses fameux anneaux et ses nombreux satellites dont Titan, le plus gros d'entre eux. Un grand nombre de paysages familiers (mers, lacs, rivières, dunes, montagnes, cratères, etc.) ont été identifiés à la surface de Titan dans un contexte géologique et climatique pourtant exotique : surface principalement composée de glace d'eau et d'hydrocarbures, températures extrêmement basses (-180°C) et climat fondé sur le cycle du méthane. Lors de sa descente dans l'atmosphère de Titan en janvier 2005, le module Huygens a permis d'identifier un réseau de vallées fluviales dendritique incisant une colline proche du site d'atterrissage, analogue aux réseaux que l'on peut observer sur Mars et sur Terre.

The Cassini-Huygens mission, which ended on September 15, 2017 after a 7-year journey and 13 years of service, made many discoveries about Saturn, its famous rings, and its many satellites, the largest of which is Titan. A large number of familiar landscapes (seas, lakes, rivers, dunes, mountains, craters, etc.) have been identified on the surface of Titan in an exotic geological and climatic context: a surface mainly composed of water and hydrocarbon ice, extremely low temperatures (-180°C), and a climate based on the methane cycle. During its descent into Titan's atmosphere in January 2005, the Huygens module identified a dendritic network of rivers incising a hill near the landing site, similar to the networks observed on Mars and Earth.

Tout comme l'eau sur Terre, le méthane liquide creuse le substrat de Titan constitué de glace d'eau et/ou d'hydrocarbures pour former des réseaux de rivières complexes. Pour mieux comprendre les processus responsables de la formation de ces paysages, il est nécessaire de disposer d'un modèle numérique de terrain (MNT) précis représentant la surface topographique de cette région.

Like water on Earth, liquid methane carves Titan substrate made of water and/or hydrocarbon ice to form complex river networks. This phenomenon is particularly striking in the images acquired near the equator by the Cassini probe. To better understand the processes responsible for the formation of these landscapes, an accurate digital terrain model (DTM) representing the topographic surface of this region is required. The first and, until recently, only DTM of the Huygens module landing site was produced



Modèle numérique de terrain et son réseau hydrographique obtenu par un algorithme de routage. Les couleurs sont associées à l'altitude allant de 0 à 420 mètres.
Digital terrain model and its hydrographic network obtained by a routing algorithm. The colors are associated with the altitude ranging from 0 to 420 meters.
© Daudon et al.

Le premier et jusqu'à peu, le seul MNT du site d'atterrissage du module Huygens a été produit par l'USGS (United States Geological Survey) en appliquant la technique de la photogrammétrie sur des images acquises par les caméras DISR (Descent Imager/Spectral Radiometer). Réalisé en 2005 dans des conditions non optimales (géométries de prises de vue inadaptées à la reconstruction photogrammétrique et faible nombre d'images originales), ce MNT présente un certain nombre d'imperfections et d'incohérences qui limitent son utilisation pour l'analyse précise de la formation des rivières observées sur ce site.

Des chercheurs de l'IPGP et leurs collègues internationaux ont mis en place une nouvelle approche, bénéficiant d'un récent traitement des images DISR qui améliore sensiblement la qualité des images d'origine. Pour la reconstruction du MNT, les scientifiques ont utilisé MicMac, un logiciel de photogrammétrie libre d'accès et hautement paramétrable. Afin de surmonter les difficultés liées à la qualité des données et à la complexité des prises de vue (configuration géométrique inhabituelle), une chaîne de traitement spécifique a été développée. Ils ont appliqué des concepts de géomorphologie quantitative (sens d'écoulement des rivières par exemple) pour évaluer les dernières ambiguïté sur l'orientation globale du MNT.

Grâce à cette approche, les chercheurs ont obtenu un MNT couvrant une surface plus importante et avec un bien

by USGS (United States Geological Survey) by applying the technique of photogrammetry to images acquired by the DISR (Descent Imager/Spectral Radiometer) cameras. Realized in 2005 under non-optimal conditions (shooting geometries unsuitable for photogrammetric reconstruction and low number of original images), this DTM presents a number of imperfections and inconsistencies that limit its use for the precise analysis of river formation observed on this site.

IPGP researchers and their international colleagues have implemented a new approach, benefiting from recent DISR image processing that significantly improves the quality of the original images. For the reconstruction of the DTM, the scientists used MicMac, an open-source and highly configurable photogrammetry software. In order to overcome the difficulties related to the quality of the data and the complexity of the shots (unusual geometrical configuration), a specific processing chain was developed. Quantitative geomorphology concepts (e.g., river flow direction) were applied to assess the latest ambiguities on the overall orientation of the DTM.

Thanks to this new approach, the researchers obtained a DTM covering a larger area than previously with a much better spatial sampling (18 meters, the most resolved for the surface of Titan). In fact, this new DTM significantly improves the USGS DTM. It provides the scientific community with a fundamental tool, now accurate and unbiased,

meilleur échantillonnage spatial (18 mètres, le plus résolu de la surface de Titan) que précédemment. De fait, ce nouveau MNT améliore significativement celui de l'USGS. Il met à disposition de la communauté scientifique un outil fondamental, désormais précis et non biaisé, pour poursuivre l'étude quantitative de la formation des vallées fluviales et des processus d'érosion et d'incision causée par le méthane liquide sur Titan.

to continue the quantitative study of the formation of river valleys and the erosion and incision processes caused by liquid methane on Titan.



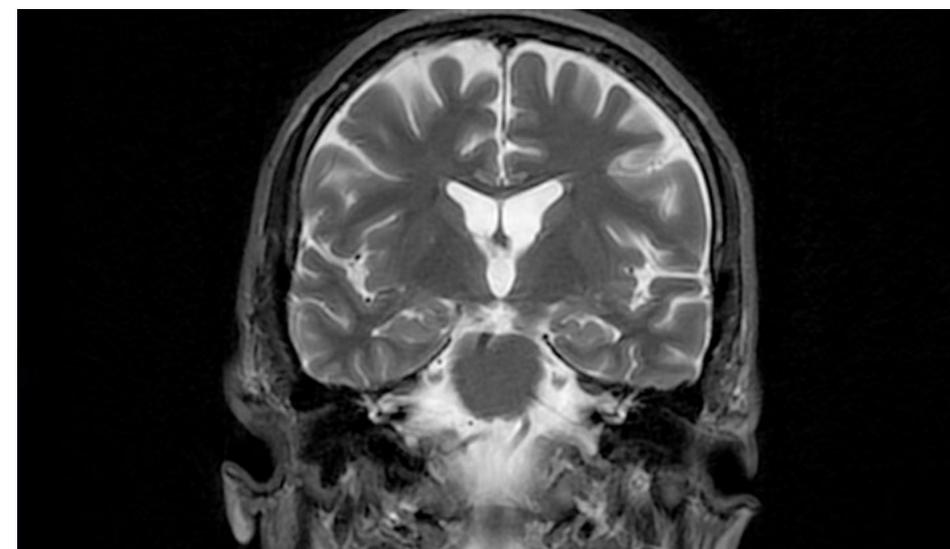
Ref : Daudon C., Lucas A., Rodriguez S., Jacquemoud S., Escalante López A., Grieger B., et al. (2020). A new digital terrain model of the Huygens landing site on Saturn's largest moon, Titan. *Earth and Space Science*, 7, e2020EA001127. DOI: 10.1029/2020EA001127
Contact : daudon@ipgp.fr

#3

Maladie d'Alzheimer : la cosmochimie au service du cerveau Alzheimer's disease: when cosmochemistry helps the brain

En ayant recours à des techniques traditionnellement utilisées en cosmochimie pour étudier la formation des planètes, des chercheurs de l'IPGP et de la Faculté de Santé d'Université de Paris ont mis en évidence une caractéristique particulière dans la composition des métaux présents dans le cerveau de patients atteints de la maladie d'Alzheimer.

By applying techniques traditionally used in cosmochemistry to study the formation of planets, researchers from the IPGP and the Faculty of Health of Université de Paris have highlighted a specific pattern in the chemical composition of metals present in the brain of patients suffering from Alzheimer's disease.



IRM du cerveau d'un patient atteint de la maladie d'Alzheimer.
Brain MRI of a patient with Alzheimer's disease.
© IPGP - Moynier

En effet, une des conséquences de cette maladie est la formation dans le cerveau de plaques extracellulaires riches en métaux, notamment en cuivre et en zinc : les plaques amyloïdes et les fibrilles tau. Les concentrations de ces deux métaux dans les tissus humains varient naturellement dans le temps, par exemple en fonction de l'alimentation, la mesure de leur abondance s'avère insuffisante pour détecter la formation de ces plaques extracellulaires.

En mesurant les rapports isotopiques du cuivre et du zinc dans des échantillons de tissus de cerveaux atteints de la maladie d'Alzheimer d'une part et de cerveaux sains d'autre part, les chercheurs ont montré que la présence de plaques amyloïdes dans le cerveau d'une personne malade modifiait le rapport isotopique du cuivre. Cet enrichissement en isotopes légers du cuivre s'explique par un changement d'état d'oxydation de ce dernier lors de la formation des plaques amyloïdes et des fibrilles tau.

Ces résultats ouvrent la voie à un suivi de l'évolution de la maladie d'Alzheimer grâce à la mesure du rapport isotopique du cuivre dans le cerveau des patients. Les équipes impliquées poursuivent maintenant leurs études afin de déterminer si des changements similaires peuvent être détectés dans le sang ou dans le liquide céphalo-rachidien, plus simplement prélevables que les tissus du cerveau.



Ref : Moynier F., Le Borgne M., Lahoud E., Mahan B., Mouton-Ligier F., Hugon J. & Paquet C. *Copper and zinc isotopic excursions in the human brain affected by Alzheimer's disease*, *Alzheimer's Dement*, 12:e12112, 2020. DOI: 10.1002/dad2.12112

Contact : moynier@ipgp.fr

Indeed, one of the consequences of this disease is the formation of extracellular plaques rich in metals, particularly copper and zinc, in the brain: amyloid plaques and tau fibrils. As the concentrations of these two metals in human tissues vary naturally over time, depending on nutrition for example, the mere measurement of their abundance is insufficient to detect the formation of these extracellular plaques.

By measuring the isotope ratios of copper and zinc in tissue samples from brains of Alzheimer's patients on the one hand and of healthy brains on the other hand, the researchers have shown that the presence of amyloid plaques in the brain of an unhealthy patient changed the isotope ratio of copper. This enrichment in light copper isotopes is due to a change in the oxidation state of copper during the formation of amyloid plaques and tau fibrils.

These results pave the way to follow the evolution of Alzheimer's disease by measuring the isotope ratio of copper in patients' brain. The teams involved continue their studies to determine whether similar changes could be detected in the blood or in the cerebrospinal fluid, which can be sampled more easily than the brain tissue.

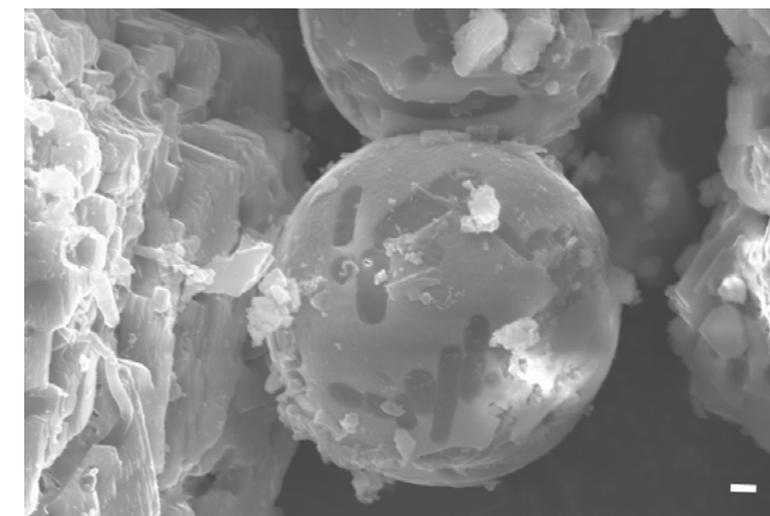
#4

Nouvelle approche pour les reconstructions paléoenvironnementales valorisant les carbonates formés en conditions de déséquilibre isotopique

A new approach for paleoenvironmental reconstructions using carbonates formed in conditions of isotopic disequilibrium

Les paléotempératures sont généralement reconstruites à partir des analyses du $\delta^{18}\text{O}$ (rapport isotopique de l'oxygène $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) et/ou du Δ_{47} (surabondance de la liaison entre isotopes lourds $^{18}\text{O}\text{-}^{13}\text{C}$ dans le carbonate, par rapport à une distribution aléatoire) des carbonates, mais ces reconstructions paléo environnementales sont

Paleotemperatures are generally reconstructed from the $\delta^{18}\text{O}$ (oxygen isotope ratio $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) and/or Δ_{47} (occurrence of the bond between the heavy isotopes $^{18}\text{O}\text{-}^{13}\text{C}$ in the carbonate compared to a random distribution) analyses of carbonates, but these paleoenvironmental reconstructions are compromised for carbonates having



Carbonates biogéniques formés par la souche bactérienne *Sporosarcina pasteurii* utilisés dans cette étude et imagés par microscopie électronique à balayage. Échelle = 1 μm .
Biogenic carbonates formed by the bacterial strain *Sporosarcina pasteurii* used in this study and imaged by scanning electron microscopy. Scale = 1 μm .
© IPGP

compromises lorsque les carbonates ont précipité en déséquilibre isotopique avec leur environnement. En conséquence, ces carbonates sont le plus souvent écartés des reconstructions paléoclimatiques ou leur analyse isotopique fait objet de corrections qui introduisent une erreur significative sur les températures reconstruites. Cependant, ces carbonates en déséquilibre isotopique, généralement formés par le vivant, représentent la majorité des carbonates formés sur Terre.

Une équipe de chercheurs de l'IPGP a montré que l'examen conjoint des compositions en $\delta^{18}\text{O}$ et Δ_{47} de carbonates biogéniques en déséquilibre permettait néanmoins de reconstituer la composition isotopique de l'eau dans laquelle s'est formée le carbonate, qu'il s'agisse d'eau porale, d'eau de mer ancienne, ou de l'eau interne aux organismes précipitant les carbonates.

Cette nouvelle approche offre désormais la possibilité d'inclure les carbonates en déséquilibre isotopique dans les reconstructions paléoenvironnementales. Elle permettra ainsi de mieux quantifier les grands cycles érosifs et tectoniques qui contrôlent la composition isotopique de l'eau de mer au cours du temps, ou de mieux contraindre les processus intracellulaires qui permettent la biominéralisation de carbonates.



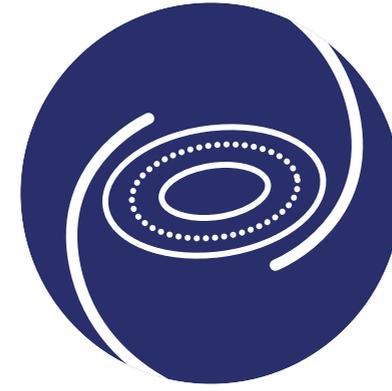
Ref : Thaler C., Katz A., Bonifacie M., Ménez B. & Ader M. *Oxygen isotope composition of waters recorded in carbonates in strong clumped and oxygen isotopic disequilibrium*, *Biogeosciences*, 17(7):1731-1744, 2020. DOI: 10.5194/bg-17-1731-2020

Contact : ader@ipgp.fr

precipitated in isotopic disequilibrium with their environment. Consequently, such carbonates are most often discarded from paleoclimatic reconstructions, or their isotopic analysis is subject to corrections that introduce a significant error on the reconstructed temperatures. However, these carbonates in isotopic disequilibrium, generally formed by living organisms, represent the majority of carbonates formed on Earth.

IPGP researchers showed that the joint examination of the compositions in $\delta^{18}\text{O}$ and Δ_{47} of biogenic carbonates in disequilibrium nevertheless makes it possible to reconstitute the isotopic composition of the water in which the carbonate was formed, be it pore water, ancient seawater, or internal water in the organisms precipitating the carbonates.

This new approach offers the possibility of including carbonates formed in isotopic disequilibrium in paleoenvironmental reconstructions. As a consequence, it is now possible to better quantify the major erosive and tectonic cycles that control the isotopic composition of seawater over time, and to better constrain intracellular processes that allow for the biomineralization of carbonates.



Origines Origins

Les planètes du Système solaire présentent des compositions et structures particulièrement variées, aux origines encore largement débattues. L'étude des processus primordiaux s'avère essentielle pour comprendre comment ils ont pu contrôler à la fois la dynamique de formation, la composition et l'évolution de ces astres, mais également la chimie prébiotique et les conditions environnementales relatives au développement des premiers organismes vivants sur Terre, voire sur d'autres planètes et exoplanètes. L'IPGP est l'un des rares établissements où des scientifiques de multiples domaines de recherche tels que la géologie, la géochimie, la cosmochimie, la géophysique, la géobiologie et l'astrophysique peuvent travailler ensemble sur le décryptage de ces questions fondamentales. Cette édition 2020 du rapport annuel met en avant les nouveaux outils chimiques et isotopiques (Deng et al., 2020) ainsi que les approches expérimentales de pointe (Robert et al., 2020 ; Huang et al., 2020) et interdisciplinaires (Lecoeuvre et al., 2020) développés à l'IPGP.

The planets of the Solar System present particularly varied compositions and structures, the origins of which are still widely debated. The study of the primordial processes is essential to understand how they controlled the formation dynamics, composition and evolution of these planets, but also the prebiotic chemistry and the environmental conditions relating to the development of the first living organisms on Earth, and even on other planets and exoplanets. The IPGP is one of the few institutions where scientists from multiple fields of research such as geology, geochemistry, cosmochemistry, geophysics, geobiology and astrophysics can work together to decipher these fundamental questions. This 2020 edition of the annual report highlights new chemical and isotopic tools (Deng et al., 2020), state-of-the-art experimental approaches (Robert et al., 2020; Huang et al., 2020) and interdisciplinary approaches (Lecoeuvre et al., 2020) developed at the IPGP.

#1

Une météorite dévoile un climat chaud sur Mars il y a 4,4 milliards d'années

A meteorite reveals a warm climate on Mars 4.4 billion years ago

Une étude menée par des chercheurs de l'IPGP révèle qu'il y a 4,4 milliards d'années, la jeune atmosphère martienne était suffisamment chaude pour maintenir de l'eau à l'état liquide, contrairement aux températures actuelles (inférieures à -20°C) qui ne le permettent plus. Cette conclusion fait suite à la découverte en 2011 au Maroc de la météorite NWA 7533, aussi surnommée « Black Beauty ». Ce fragment de roche martienne, arrivé sur Terre après un long voyage interplanétaire, a probablement dû être éjecté dans l'espace à la suite d'un impact. « Black Beauty », unique par sa composition chimique similaire aux roches de l'hémisphère sud de la planète rouge, contient les plus anciens fragments connus de la croûte de Mars, remontant jusqu'à 4,4 milliards d'années. L'analyse de cette météorite, qui a nécessité l'utilisation de nouveaux outils chimiques et isotopiques développés à l'IPGP, notamment autour du titane, a révélé une oxydation de la croûte de Mars, certainement liée aux nombreux impacts que subissait la planète. Cette oxydation aurait pu induire, par effet de serre, un réchauffement de l'atmosphère permettant de maintenir de l'eau à l'état liquide, malgré une production d'énergie solaire 30 % plus faible qu'aujourd'hui.

A study conducted by IPGP researchers reveals that 4.4 billion years ago, the young Martian atmosphere was warm enough to maintain water in a liquid state, unlike today's temperatures (below -20°C) which no longer allow it. This conclusion follows the discovery in 2011 in Morocco of the meteorite NWA 7533, also nicknamed "Black Beauty". This fragment of Martian rock, which arrived on Earth after a long interplanetary journey, probably had to be ejected into space following an impact. "Black Beauty", unique in its chemical composition similar to rocks in the southern hemisphere of the Red Planet, contains the oldest known fragments of the Martian crust, dating back 4.4 billion years. The analysis of this meteorite, which required the use of new chemical and isotopic tools developed at the IPGP, especially involving titanium, revealed an oxidation of the Martian crust, likely related to the numerous impacts the planet was undergoing. This oxidation could have induced, by greenhouse effect, a warming of the atmosphere allowing to maintain water in a liquid state, in spite of a solar energy production 30% lower than today.



Ref : Deng Z., Moynier F., Villeneuve J., Jensen N. K., Liu D., Cartigny P., Mikouchi T., Siebert J., Agranier A., Chaussidon M. & Bizzarro M. *Early oxidation of the martian crust triggered by impacts. Sci. Adv. 6, eabc4941, 2020.*

DOI: 10.1126/sciadv.abc4941

Contact : moynier@ipgp.fr



La météorite martienne NWA 7533, surnommée « Black Beauty ».
The Martian meteorite NWA 7533, nicknamed "Black Beauty".

© Luc Labenne

#2

À la recherche du niobium perdu The search for lost niobium

On estime que la composition chimique de la Terre silicatée, composée de la croûte et du manteau, est similaire à celle des météorites primitives, appelées les chondrites, pour ce qui est des éléments réfractaires et lithophiles (i.e. qui ont une affinité particulière pour les roches). Toutefois, on constate que le rapport entre deux de ces éléments, le niobium et le tantale (Nb/Ta), ne respecte pas ce principe essentiel qui constitue la base des modèles de composition chimique de la Terre communément nommés « modèles chondritiques ».

Une des hypothèses pour expliquer le déficit de Nb de la Terre silicatée est qu'une partie a pu être séquestrée dans le noyau terrestre. Pour le vérifier, des chercheurs de l'IPGP ont simulé en laboratoire les conditions extrêmes de pression et température qui régnaient lors de la formation du noyau de la Terre, à l'aide de cellules à enclumes de diamant chauffées au laser. Ces expériences montrent que le niobium peut devenir sidérophile, c'est-à-dire avoir une affinité pour le fer, corroborant ainsi l'hypothèse de la présence de cet élément manquant dans le noyau.

Par ailleurs, ces résultats révèlent que la Terre primitive a dû se différencier dans un environnement relativement riche en oxygène, compte tenu des concentrations de Nb et Ta observées actuellement au sein de la Terre silicatée. En effet, la quantité d'O₂ affecte directement la manière dont ces deux éléments se distribuent entre le noyau et le manteau.

Par conséquent, les matériaux primitifs qui ont formé la Terre ne peuvent pas être apparentés à un seul type de météorites pauvres en oxygène, les chondrites à enstatite, comme il est communément admis dans les modèles de formation planétaire. La Terre a certainement dû se constituer à partir d'un mélange de matériaux provenant de réservoirs distincts de la nébuleuse solaire, situés à des distances variables du Soleil.

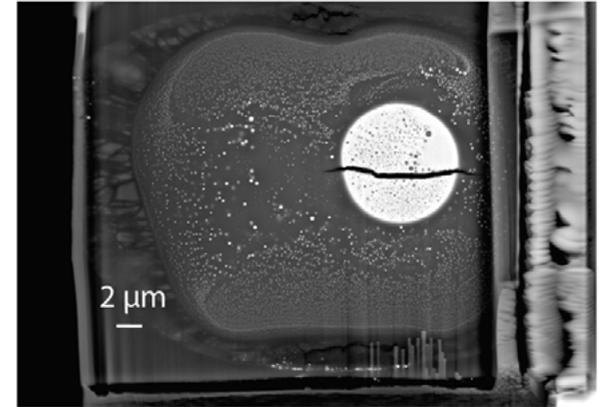


Image électronique d'un échantillon de cellule à enclume diamant synthétisé à 50 GPa (environ 1500 km de profondeur) et 4000 °C. Cette expérience reproduit directement les conditions d'équilibre entre le noyau et le manteau qui ont eu lieu à la base d'un océan de magma profond lors de la formation du noyau de la Terre. L'analyse chimique du métal (bille claire) montre que le niobium manquant de la Terre silicatée peut se trouver dans le noyau.

Electronic image of a diamond anvil cell sample synthesized at 50 GPa (1500 km depth roughly) and 4000 °C. This experiment reproduces directly the conditions of core-mantle equilibration at the base of a deep magma ocean during Earth's core formation. Chemical analyses of the metal (bright sphere) show that the Earth's missing niobium likely resides in the core.

© IPGP

The chemical composition of the silicate Earth, consisting of the crust and mantle, is thought to be similar to that of primitive meteorites, called chondrites, in terms of refractory and lithophile elements (i.e. having a particular affinity for rocks). However, the ratio of two of these elements, niobium and tantalum (Nb/Ta), does not respect this essential principle which forms the basis of the models of the Earth's chemical composition commonly known as "chondritic models".

One of the hypotheses to explain the Nb deficit in the silicate Earth is that some of it may have been sequestered in the Earth's core. To verify this, IPGP researchers have simulated the extreme pressure and temperature conditions that prevailed during the formation of the Earth's core in the laboratory, using laser-heated diamond anvil cells. These experiments show that niobium can become siderophile, i.e. have an affinity for iron, thus corroborating the hypothesis of the presence of this missing element in the core.



Ref : Huang D., Badro J. & Siebert J. *The niobium and tantalum concentration in the mantle constrains the composition of Earth's primordial magma ocean. Proceedings of the National Academy of Sciences Nov 2020, 117 (45) 27893-27898.*

DOI: 10.1073/pnas.2007982117

Contact : siebert@ipgp.fr

Furthermore, these results reveal that the primitive Earth must have differentiated in a relatively oxygen-rich environment, given the concentrations of Nb and Ta currently observed in the silicate Earth. Indeed, the amount of O₂ directly affects the way these two elements are distributed between the core and the mantle.

Therefore, the primitive materials that formed the Earth cannot be related to a single type of oxygen-poor meteorites, enstatite chondrites, as is commonly accepted in models of planetary formation. The Earth must certainly have been formed from a mixture of materials from separate reservoirs in the solar nebula, located at varying distances from the Sun.



Ref : Lecoivre A., Ménez B., Cannat M., Chavagnac V. & Gérard E. *Microbial ecology of the newly discovered serpentinite-hosted Old City hydrothermal field (southwest Indian ridge). ISME J. 2020.*

DOI: 10.1038/s41396-020-00816-7

Contact : lecoivre@ipgp.fr

theory for the origin of life. This work thus opens up promising perspectives for understanding the environmental parameters that shape life in these hydrothermal systems. These microbial communities also inform about abiotic organic synthesis pathways that could prevail in these environments and support life, or even chemistry of prebiotic interest, in the rocky subsurface.

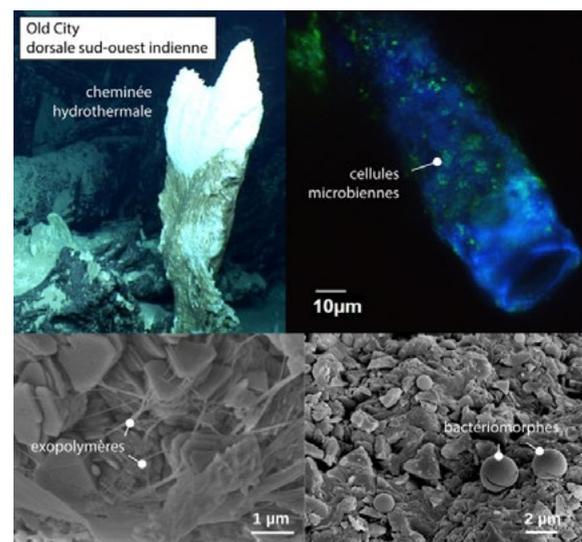
#3

Les communautés microbiennes du site hydrothermal alcalin d'Old City, un analogue pour l'étude des métabolismes anciens et l'origine de la vie

Microbial communities of the Old City alkaline hydrothermal site, a modern analogue for the study of ancient metabolisms and the origin of life

Une étude dirigée par des scientifiques de l'IPGP décrit pour la première fois les communautés microbiennes du site hydrothermal alcalin d'Old City récemment découvert par l'IPGP-Université de Paris, à environ 3100 mètres de profondeur au niveau de la dorsale sud-ouest indienne. Ce site constitue le premier analogue océanique de l'emblématique système hydrothermal de Lost City, considéré depuis sa découverte le long de la dorsale médio-atlantique au début des années 2000 comme un modèle de premier ordre pour la théorie hydrothermale de l'origine de la vie. Ces travaux ouvrent donc des perspectives prometteuses pour la compréhension des paramètres environnementaux qui façonnent la vie dans ces systèmes hydrothermaux. Ces communautés microbiennes nous renseignent également sur les voies de synthèse organique abiotique qui pourraient prévaloir au sein de ces environnements et soutenir la vie, voire une chimie prébiotique, dans les roches de la subsurface.

A study led by the IPGP describes for the first time the microbial communities of the alkaline hydrothermal site of Old City recently discovered by the IPGP - Université de Paris, at about 3,100 meters depth near the southwestern Indian ridge. This site is the first oceanic analogue of the emblematic Lost City hydrothermal system, considered since its discovery along the Mid-Atlantic Ridge in the early 2000s as a first-order model for the hydrothermal



Cheminées carbonatées du site hydrothermal d'Old City (dorsale sud-ouest indienne) au sein desquelles ont été imagées et caractérisées les communautés microbiennes.

Carbonate chimneys of the hydrothermal site of Old City (southwestern Indian ridge) where microbial communities were imaged and characterized.

© IFREMER/IPGP

#4

Un nouvel effet isotopique ouvre des pistes inattendues sur la formation du système solaire

A new isotopic effect opens unexpected implications on the formation of the solar system

Dans un article paru dans Nature Astronomy, une équipe scientifique internationale confirme expérimentalement l'existence d'un nouvel effet isotopique, découvert il y a 35 ans lors de la synthèse de l'ozone. Celui-ci pourrait expliquer certaines des « anomalies » isotopiques observées dans les météorites et généralement attribuées à des processus de nucléosynthèse au sein des étoiles. Cet effet a été observé dans des condensats riches en titane, un élément réfractaire emblématique de ces anomalies isotopiques. Ces derniers sont fabriqués dans un plasma produit par une décharge haute fréquence à l'intérieur d'une vapeur de chlorure de titane solubilisé dans un liquide organique.

In an article published in Nature Astronomy, an international scientific team experimentally confirms the existence of a new isotopic effect, discovered 35 years ago during the synthesis of ozone. This could explain some of the isotopic "anomalies" observed in meteorites and generally attributed to nucleosynthesis processes within stars. This effect was observed in condensates rich in titanium, a refractory element emblematic of these isotopic anomalies. The latter are produced in a plasma produced by a high-frequency discharge inside a vapor of titanium chloride solubilized in an organic liquid.

Ce nouvel effet isotopique, de par son ampleur et ses propriétés, viole les règles habituellement considérées comme régissant la distribution des isotopes au cours des réactions chimiques. Il pourrait concerner d'autres éléments chimiques importants en cosmochimie et ouvre la voie à des études théoriques et expérimentales dans un domaine jusqu'ici mal connu : les réactions chimiques dans les plasmas naturels. Les implications potentielles vont de la formation du système solaire aux processus stellaires.

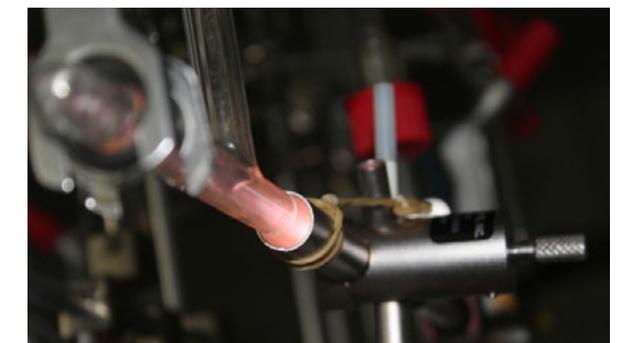
This new isotopic effect, because of its magnitude and properties, violates the rules usually considered to govern the distribution of isotopes during chemical reactions. It could concern other chemical elements that are important in cosmochemistry and opens the way to theoretical and experimental studies in a hitherto not well known field: chemical reactions in natural plasmas. The potential implications range from the formation of the solar system to stellar processes.



Ref : Robert F., Tartèse R., Lombardi G., Reinhardt P., Roskosz M., Doisneau B., Deng Z. & Chaussidon M. (2020) *Mass-independent fractionation of titanium isotopes and its cosmochemical consequences. Nature Astronomy.*

DOI: 10.1038/s41550-020-1043-1

Contact : chaussidon@ipgp.fr



Décharge haute fréquence dans un plasma à environ 10000K.

High-frequency discharge in a plasma at about 10000K.

© MNHN/IMP/PMC/CNRS

Entretien avec Fabrice R. Fontaine, nouveau directeur de l'OVSM-IPGP, sur le récent passage en vigilance jaune de la Montagne Pelée Interview with Fabrice R. Fontaine, new Director of the OVSM-IPGP, on the recent yellow alert status of Mount Pelée

1. Qu'est-ce qui vous a amené à prendre la direction de l'OVSM-IPGP ?

J'ai pris mes fonctions de nouveau directeur et responsable scientifique de l'observatoire volcanologique et sismologique de la Martinique (OVSM) de l'IPGP le 1^{er} septembre 2020.

J'ai obtenu un doctorat en géophysique à l'Université Montpellier II en 2005. J'ai ensuite effectué un post-doctorat de deux ans en sismologie à l'ANU (The Australian National University, Canberra), avant de rejoindre le Laboratoire GéoSciences Réunion de l'Université de La Réunion où je suis devenu maître de conférences en 2009 et membre de l'équipe Systèmes volcaniques de l'IPGP. Je suis par ailleurs titulaire d'une habilitation à diriger les recherches depuis 2016.

La Montagne Pelée m'intéresse tout particulièrement car c'est un volcan explosif actif pour lequel nous disposons de nombreuses données, suite à la création par Alfred Lacroix après l'éruption de 1902 du deuxième plus ancien observatoire au monde (après celui du Vésuve en Italie).

2. Le volcan est passé récemment en vigilance jaune, pour quelle raison ?

Depuis l'installation de réseaux d'observation modernisés dans les années 80, la sismicité d'origine volcanique sous la Montagne Pelée est restée très faible, avec l'enregistrement de « seulement » quelques dizaines de séismes par an en moyenne. Des essaims de séismes ont déjà été clairement détectés en 1980, en 1985-1986, en 2007 et en 2014. Cependant, l'origine des essaims de 2007 et 2014 a pu être directement reliée à des séismes de forte magnitude dans l'arc antillais et non pas sous la Montagne Pelée. L'augmentation de la sismicité d'origine



1. What led you to take over the management of the OVSM-IPGP?

I took up my position as the new Director and Chief Scientific Officer of the Volcanological and Seismological Observatory of Martinique (OVSM) of the IPGP on September 1, 2020.

I received a PhD in geophysics from the University of Montpellier II in 2005. I then did a two-year post-doctoral fellowship in seismology at ANU (Australian National University, Canberra), before joining the Laboratory of Geosciences at the University of Reunion Island where I became a lecturer in 2009 and a member of IPGP's Volcanic Systems team. I also have held an accreditation to supervise research since 2016.

I am particularly interested in Mount Pelée since it is an active explosive volcano for which we have a great amount of data, following the creation by Alfred Lacroix after the 1902 eruption of the second oldest observatory in the world (after Vesuvius in Italy).

2. The volcano has recently been placed on yellow alert. Why?

Since the establishment of modernized observation networks in the 1980s, volcano-related seismicity under Mount Pelée has remained very low, with "only" a few dozen earthquakes being recorded per year on average. Earthquake swarms have already been clearly detected in 1980, in 1985-1986, in 2007 and in 2014. However, the origin of the 2007 and 2014 swarms could be directly connected to high magnitude earthquakes in the Lesser



volcanique superficielle (jusqu'à 4-5 km sous le sommet) observée depuis avril 2019 (avec 34 séismes détectés en un mois) se situe donc nettement au-dessus du niveau de base caractéristique de ce volcan.

Bien que cette activité sismique puisse être liée à l'augmentation graduelle de la sismicité à l'échelle régionale (des travaux de recherche sont en cours) qui perturberait le champ de contraintes du volcan, elle n'est manifestement pas associée à des séismes tectoniques majeurs tels qu'en 2007 et 2014. Elle pourrait donc résulter de modifications de l'activité du système hydrothermal sous le volcan. En effet, une sismicité volcanique est apparue en profondeur autour et sous la Montagne Pelée (à plus de 10 km sous le niveau de la mer) en avril 2019. Elle pourrait correspondre à l'arrivée en profondeur de fluides magmatiques.

En outre, de nouveaux signaux enregistrés de type trémor ont été observés les 8 et 9 novembre 2020 qui pourraient également correspondre à une réactivation du système hydrothermal. Des recherches sont actuellement menées pour mieux déterminer les processus à l'origine de ces signaux et notamment une influence éventuelle des fortes précipitations lors de cette période.

Même si, en l'état actuel des mesures, aucune déformation du volcan n'a été observée à l'échelle du réseau de

Antilles Arc rather than under Mount Pelée. The increase in seismicity of superficial volcanic origin (up to 4-5 km below the summit) observed since April 2019 (with 34 earthquakes detected in one month) is therefore well above the characteristic baseline level of this volcano.

Although this seismic activity may be related to the gradual increase in regional seismicity (research is ongoing on this subject) that would disrupt the volcano's stress field, it is clearly not associated with major tectonic earthquakes such as in 2007 and 2014. It could be the result of changes in the activity of the hydrothermal system beneath the volcano. Volcanic seismicity appeared at depth around and beneath Mount Pelée (more than 10 km below sea level) in April 2019. It could correspond to the arrival of magmatic fluids at depth.

In addition, new tremor signals were recorded on November 8 and 9, 2020 which could also correspond to reactivation of the hydrothermal system. Research is currently underway to better determine the processes behind these signals, including a possible influence of heavy rainfall during this period.

Although no deformation of the volcano has been observed at the scale of the monitoring network at the present time, the appearance of these three different types of volcanic seismic signals in a few months shows a clear



L'observatoire construit par la collectivité territoriale de Martinique (CTM) avec un financement FEDER.
The observatory built by the territorial authority of Martinique (CTM) with ERDF funding.
© OVSM-IPGP

surveillance, l'apparition de ces trois différents types de signaux sismiques d'origine volcanique en quelques mois montre un changement clair du comportement du système volcanique, avec une activité en augmentation par rapport au niveau de base observé sur plusieurs décennies.

En conséquence, l'OVSM-IPGP, après discussion avec une vingtaine d'experts de l'institut, a décidé de renforcer sa vigilance et de recommander le passage au niveau d'alerte jaune. Celui-ci correspond à un renforcement des moyens d'observation déployés par l'observatoire et une mobilisation de moyens humains et instrumentaux supplémentaires à l'IPGP afin de mieux suivre et analyser en temps réel le fonctionnement et l'évolution du système volcanique. La préfecture de Martinique a suivi cette préconisation et la zone de la Montagne Pelée est passée au niveau jaune d'alerte volcanique depuis le 4 décembre 2020.

3. Comment envisagez-vous l'évolution de la situation ?

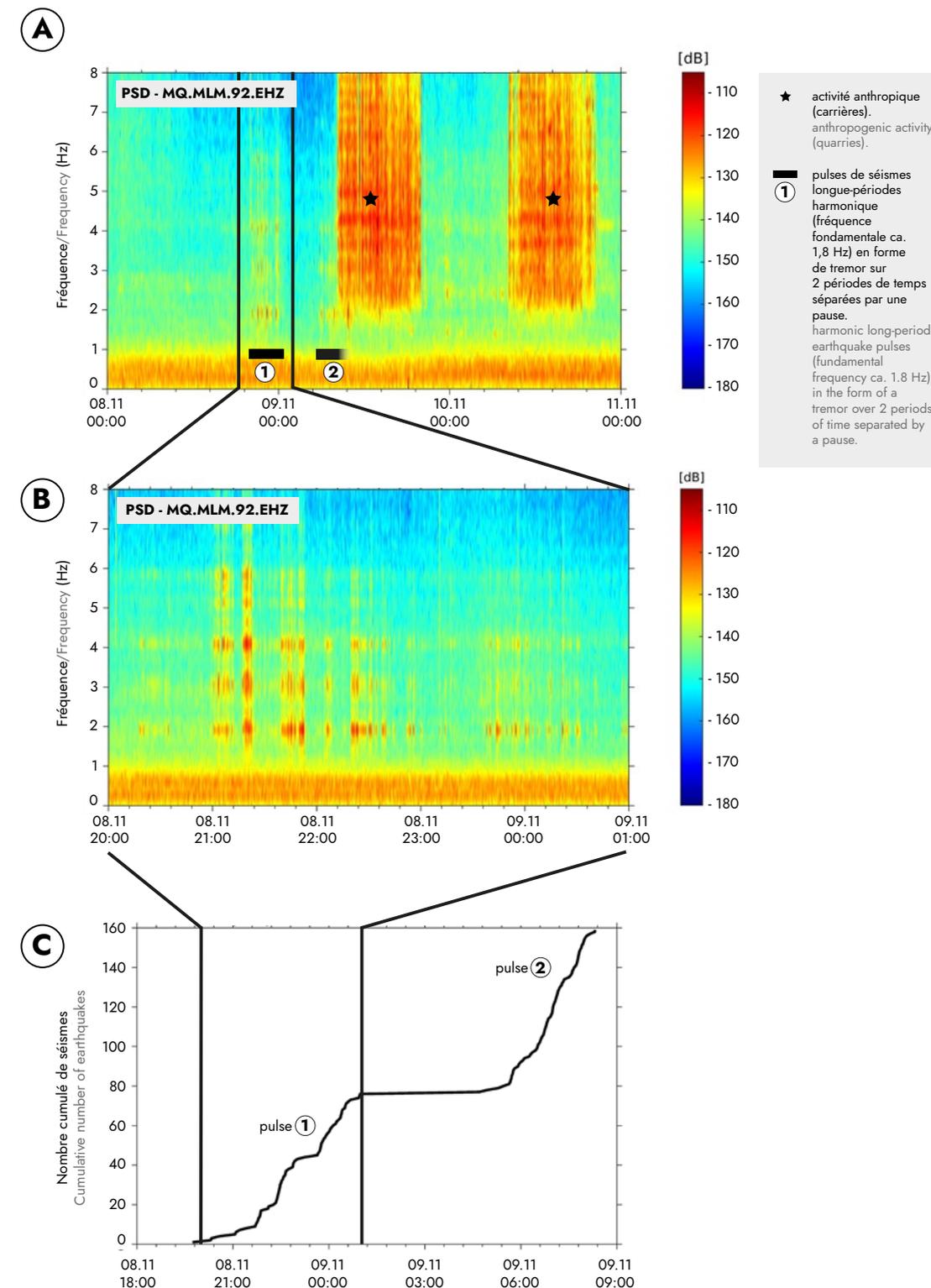
Actuellement, nous ne pouvons prédire ni la date, ni le lieu, ni même la nature, l'intensité ou encore la durée de la prochaine éruption. En revanche, nous savons que les dernières éruptions de la Montagne Pelée depuis 1635 (la dernière s'est produite entre 1929 et 1932) ont été systématiquement associées, quelques mois auparavant, à la présence de signes précurseurs : augmentation des séismes ressentis par la population, intensification des fumerolles et odeurs de gaz sulfurés. Aucun de ces signes n'a été observé jusqu'à présent.

change in the behavior of the volcanic system, with activity increasing from the baseline level observed over several decades.

As a result, the OVSM-IPGP, after discussion with some twenty of the institute's experts, decided to increase its monitoring and advise raising the alert level to yellow. This involves reinforcing the observation means deployed by the observatory and mobilizing additional human and instrumental resources at the IPGP in order to better monitor how the volcanic system is functioning and evolving, and analyze this information in real time. The prefecture of Martinique has followed this recommendation and the Mount Pelée area has been placed on yellow alert since December 4, 2020.

3. How do you see the situation developing?

At present, we cannot predict the date, place, nature, intensity or duration of the next eruption. However, we do know that the last eruptions of Mount Pelée since 1635 (the last one occurring between 1929 and 1932) were systematically associated with the presence, a few months prior, of precursors that served as warning signs: an increase in the earthquakes felt by the population, an intensification of fumaroles, and odors of sulfurous gases. None of these signs have been observed to date.



Enregistrements de deux épisodes de trémor les 8 et 9 novembre 2020 obtenus par une station sismologique de l'OVSM-IPGP.
Recordings of two tremor events on November 8 and 9, 2020 obtained by an OVSM-IPGP seismological station.
© IPGP



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 géré par l'IPGP, auquel participe aussi le service d'observation magnétique de l'EOST à Strasbourg. 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/Sop (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). Ces données sont distribuées sur le portail web du BCMT, celui d'INTERMAGNET, mais aussi à travers les centres de données mondiaux pour les données magnétiques (World Data Centres - WDC) au Royaume-Uni, aux USA et au Japon. Ces données sont utilisées en premier lieu pour des activités de recherche (dynamique du noyau liquide de la Terre, conductivité du manteau, structure de la croûte, dynamiques de l'ionosphère et de la magnétosphère), mais également comme des références d'orientation pour l'industrie 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 "National Observation Service"; (SNO) of the CNRS-INSU under IPGP's responsibility. The magnetic observation service of the EOST (Strasbourg) is also part of the BCMT. 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/Sop (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). These data are distributed through the BCMT web portal, the INTERMAGNET web portal, but also through the World Data Centres (WDCs) for magnetic data in the UK, USA and Japan. 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 2020

Activities in 2020

Levé bisannuel du réseau de répétitions

Durant les mois de juin et juillet 2020, l'équipe des observatoires magnétiques a procédé au levé magnétique bisannuel du réseau de répétitions métropolitain français, composé de 11 stations localisées dans les aéroports de Biarritz, Brive, Cannes, Caen, La Roche-sur-Yon, Nancy, Figari, Lyon, Morlaix, Perpignan et Valenciennes. Les mesures de la direction et de la force du champ magnétique s'effectuent de nuit, sur plusieurs heures et permettent de donner une image précise de son orientation au niveau de la France, indépendamment des modèles habituels.

Distribution des données secondes

Les données secondes définitives des observatoires magnétiques de l'IPGP, qui n'étaient distribuées qu'à travers le portail du BCMT, sont maintenant distribuées aussi par INTERMAGNET dans un format binaire particulier (CDF – Common Data Format) développé par la NASA. Ce format réduit significativement le volume des fichiers et permet un stockage et des temps de distribution réduits des données et métadonnées. La traduction dans ce format des données secondes définitives du BCMT est en cours de réalisation et est maintenant intégrée dans la chaîne normale de traitement des données des observatoires de l'IPGP.

Observations magnétiques à Sop au Sénégal

La maintenance du réseau d'observatoires, du fait de la pandémie de COVID-19 et des limitations des déplacements, a été fortement perturbée en 2020. L'année a néanmoins été marquée par l'ouverture d'un nouveau site d'observation à Sop (station SOK), à proximité de Niakhar au Sénégal, qui fait suite à la fermeture de celui de M'Bour. Ce nouveau site, choisi en raison de son isolement, a été installé conjointement par GEOSCOPE et le service des observatoires magnétiques. L'énergie nécessaire pour assurer le fonctionnement des instruments est fournie par des panneaux solaires. Les variations diurnes des températures étant importantes dans cette région, l'instrumentation magnétique a dû être enterrée dans trois puits distincts de 2 m de profondeur. Les câbles reliant les instruments aux systèmes d'acquisition et de transmission des données sont eux aussi enterrés à 50 cm de profondeur. Cette installation particulière présente l'avantage de limiter son impact sur les surfaces agricoles alentour. Par ailleurs, des socles de béton fibré ont été coulés pour assurer la stabilité des instruments de mesures. La station est maintenant opérationnelle avec des données

Biennial repeat station survey

Over June and July 2020, the magnetic observation service conducted the biennial survey of the French metropolitan network of repeat stations, consisting of 11 stations located in the airports of Biarritz, Brive, Cannes, Caen, La Roche-sur-Yon, Nancy, Figari, Lyon, Morlaix, Perpignan and Valenciennes. The strength and direction of the geomagnetic field are measured during the night, over several hours, and allow to give a precise view on the magnetic field direction over France that is independent of usual magnetic field models.

Definitive second data distribution

The definitive second magnetic data recorded in IPGP's observatories, that were previously distributed only through the BCMT portal, are now also distributed through INTERMAGNET in a binary format (CDF—Common Data Format) set by NASA. This format reduces significantly the file size and the delivery time of data and metadata. BCMT second data files are currently translated in this format, and this process is now integrated to the normal treatment process of IPGP's observatory second magnetic data.

Magnetic station in Sop, Senegal

Due to COVID-19 pandemic and the associated travel constraints, the maintenance of IPGP's observatory network has been reduced to a minimum over 2020. Nonetheless it has been possible to open a new observation site in Sop (SOK station), near Niakhar in Senegal,



Mesures d'angle et de positionnement du pilier permettant la calibration de l'observatoire magnétique.
Angle and position measurements of the pillar set for the calibration data necessary for running the magnetic observatory.
© IPGP



Les trois puits avec des couvercles blancs abritent l'instrumentation magnétique tandis que le local en béton contient les systèmes de gestion de l'énergie et de transmission des données, ainsi que l'instrumentation de GEOSCOPE.
The three boreholes with their white cover, where are set the magnetic instruments. Is also visible the building containing the GEOSCOPE seismometer, together with the energy and data transmission systems.
© IPGP

collectées de bonne qualité. Les mesures manuelles hebdomadaires de calibration des données, indispensables pour qu'une station d'observation devienne un observatoire magnétique, commenceront en février/mars 2021.

Collaborations, visites et accords

L'équipe des observatoires magnétiques a accueilli durant le mois d'octobre 2020, sur le site de l'observatoire national à Chambon-la-forêt, Dr. Anca Isac de l'observatoire magnétique de Surlari en Roumanie. Suite à ce séjour au cours duquel elle a travaillé sur une approche commune de l'étude spectrale du bruit d'observation, un accord de coopération, d'échange de matériel, de compétences et de savoirs est en cours de préparation.

Un accord similaire a été signé avec l'Université de Zagreb (observatoire magnétique de Lonjsko Polje en Croatie) suite à la visite du Dr. Igor Mandic l'année passée. Ces accords portent sur les mêmes points que celui établi avec l'institut géographique national espagnol (Observatoire magnétique de Tolède) en 2019.



En savoir plus / Read more:

> www.bcmt.fr
> www.intermagnet.org

following the closure of the one in M'Bour. This new site, chosen for its remoteness, has been installed in close collaboration with IPGP's GEOSCOPE service. The power for running the station is provided through solar panels. Daily temperature variations are such in this part of Senegal that it has been necessary to set the magnetic instruments in 2 m deep boreholes. The data transmission and power cables have been also buried at 50 cm depth, limiting this way the impact of the observatory on the agriculture activities over the area. In addition, fibre-concrete pillars were set to ensure the stability of the measuring instruments. The station is now operational with good quality collected data. The weekly hand-made calibration measurements, that are necessary for the station to be an observatory, should start soon, in February or March 2021.

Visits and Conventions

Over October 2020, Dr. Anca Isac, from the magnetic observatory of Surlari in Romania visited the French national observatory in Chambon-la-forêt. Following this stay during which she worked on a common approach in the spectral domain to study the observational noise in produced data series, a Letter Of Intent (LOI) on collaborations, exchanges of instruments, skills and knowledge has been planned. Similar agreements have been signed with Zagreb University (magnetic observatory of Lonjsko Polje in Croatia) following Dr. Igor Mandic visit last year. These agreements cover the same topics as the LOI established with the Spanish national geographic institute (Magnetic observatory of Tolède) in 2019.

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 33 stations sismologiques réparties dans le monde entier, toutes équipées pour fournir des données en temps réel. GEOSCOPE est en premier lieu dédié aux travaux de recherche : 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 23 stations, ainsi que la mise à disposition de toutes les données à travers son centre de données. Celles-ci sont également disponibles via les centres de données RESIF et IRIS et sont largement utilisées par la communauté scientifique, avec au moins 1400 publications mentionnant explicitement GEOSCOPE depuis 1982 (liste disponible sur le site de GEOSCOPE). Ces données sont aussi exploitées au sein de l'observatoire, afin de fournir des informations telles que l'estimation rapide des paramètres de sources d'un tremblement de terre (catalogue disponible sur le site de GEOSCOPE). L'équipe implique directement 12 personnes, 8 à l'IPGP et 4 à l'EOST (4 enseignants-chercheurs, 7 ingénieurs et un administratif).

Activités en 2020

Activities in 2020

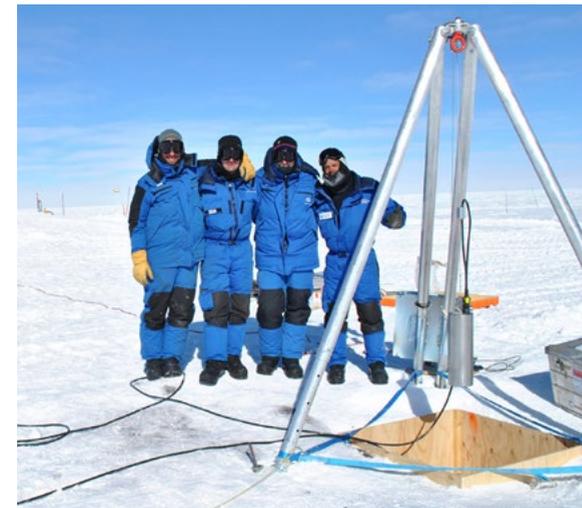
Installation d'une nouvelle station au Sénégal (SOK) en remplacement du site historique de M'Bour (MBO).

En mars 2020, la station SOK a été installée à proximité du village de Niakhar, à 60 km à l'Est de M'Bour. Pour la première fois dans le réseau GEOSCOPE, un nouveau capteur très large bande STS6A a été mis en place au fond d'un puits de 5 m de profondeur (voir photos p.62-63). La qualité du site se révèle très bonne sur la composante verticale, mais les composantes horizontales sont probablement affectées par des effets de tilt. Ce site a été instrumenté en collaboration avec les observatoires

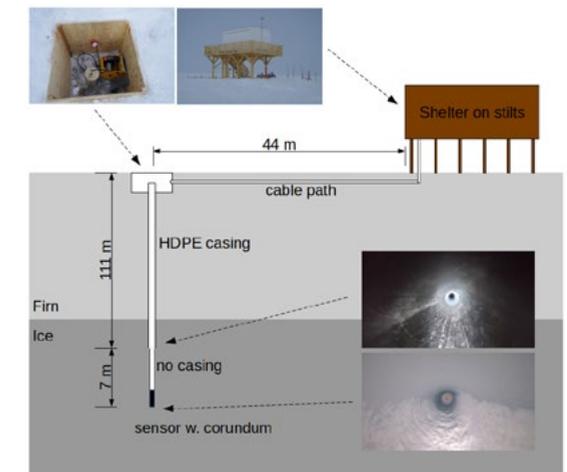
The mission of GEOSCOPE is to provide validated, high quality broadband seismic data to the French and international seismological communities. The GEOSCOPE observatory currently runs 33 seismic stations installed all over the world, all of which are equipped to provide real-time data. The GEOSCOPE observatory is primarily dedicated to research and its data are used for studies of Earth structure and dynamics, seismic sources, time dependent seismology and environmental seismology. GEOSCOPE also provides real-time data to earthquake detection and tsunami warning centers worldwide.

GEOSCOPE is an observatory jointly run by the IPGP in Paris and the EOST in Strasbourg. 23 stations are directly maintained by the IPGP and the data of all stations are distributed through the IPGP data center. Data are also available through RESIF and IRIS data centers. Data are extensively used by the scientific community, with at least 1400 publications with explicit mention GEOSCOPE since 1982 (list available on the GEOSCOPE website). Data are also widely used inside the observatory : GEOSCOPE provides data products, such as the rapid estimation of earthquake source parameters (catalog available on the GEOSCOPE website). 12 people directly contribute to GEOSCOPE, 8 from the IPGP and 4 from the EOST (4 researchers, 7 engineers and 1 administrative).

New station in Senegal (SOK) as a replacement of the historic site of M'Bour (MBO): In March 2020, the SOK station has been installed close to the village of Niakhar, 60 km East of M'Bour. For the first time in the GEOSCOPE network, the site is instrumented by a new-generation very-broadband sensor (STS6A), located at 5-meter depth (see pictures p.62-63). The site quality is very good for the vertical component, but horizontal components are likely affected by tilt effects. This site has been instrumented in collaboration with the Magnetic Observatories, with the following advantages: (1) mutualization of resources, both for instrumentation



Vue d'extérieur de l'entrée du puits (avec l'abri sismique à l'arrière-plan) et schéma du forage à la base de Concordia (Antarctique).
Entrance of the borehole (with the seismic shelter in the background) and sketch of the sensor location at the Concordia base (Antarctica).
© EOST



magnétiques, ce qui a permis : (1) de mutualiser les forces tant pour les aspects instrumentaux que pour les aspects administratifs (convention entre l'IPGP et l'IRD portant sur les deux types d'observation), (2) de faire de la station SOK un site multi-instrumenté et (3) de poursuivre les efforts communs de stations jointes avec le magnétisme, initiés en 2019 avec la station d'Edéa au Cameroun.

Nouveau capteur en forage profond à la station CCD (Concordia, Antarctique). Les collègues de l'EOST ont pu instrumenter début 2020 le forage à 120 m de profondeur qui avait été creusé en 2019. Les premières observations montrent des données de très bonne qualité, tout particulièrement sur les composantes horizontales : à longue période (> 40s), le gain est très net par rapport au capteur en surface tandis qu'à courte période (~ 0.3s), le niveau de bruit est même en dessous du modèle « bas bruit » de référence.

Travaux pour améliorer et entretenir le réseau existant. Du fait de la situation sanitaire, une seule mission à l'étranger a pu être réalisée après mars 2020 : à ATD (Djibouti), un nouvel accéléromètre a été installé en décembre 2020 et une maintenance générale de la station a été effectuée. Le reste des travaux de maintenance a dû se faire à distance en interaction avec des partenaires locaux. Bien qu'aucune opération d'envergure n'ait pu être réalisée, cette coopération a été efficace, comme le montre le fonctionnement quasi-intégral du réseau aujourd'hui.

and administrative aspects (IRD-IPGP convention for both types of instruments), (2) constitution of a multi-instrumented site and (3) further development of the collaboration initiated in 2019 with the EDA station in Cameroon.

New sensor in deep borehole at CCD station (Concordia base, Antarctica). EOST colleagues were able to instrument in January 2020 the 120-meter-deep borehole that have been dug in 2019. First observations show very high quality data, in particular on the horizontal components: at long periods (> 40s), the improvement is very clear compared to the surface sensor and at short periods (< 0.3s), the noise level is even lower than the reference "low-noise" model.

Improving and maintaining the existing network: Due to the health situation, only one mission abroad could be done after March 2020: at ATD (Djibouti), a new accelerometer has been installed in December 2020 and a global station maintenance has been conducted. Other maintenance works have been done remotely, in interaction with local partners. Although no large-scale operations could be carried out, this cooperation has been very efficient, as illustrated by the high level of performance of the network today.

Anticipation of the ageing of the STS1 broadband sensors: Numerous tests have been done on the site of the SSB station (France, Loire department) in order to compare the signals of the STS1 primary sensor with the ones of the new generation sensors (STS6A and T360).



Intérieur de la cave sismique à Djibouti (avec le nouvel accéléromètre au premier plan) et vue des environs de la station.
Interior of the seismic vault in Djibouti (with the new accelerometer in the foreground) and view of the station surroundings.
© IGP

Anticipation du vieillissement des capteurs large-bande STS1. De nombreux tests ont été faits sur le site de la station SSB (Loire, France) pour comparer les signaux entre les STS1 et les capteurs de nouvelle génération (STS6A et T360). À la suite de ces tests concluants, le premier STS6A du réseau GEOSCOPE a pu être installé au Sénégal.

Amélioration de l'infrastructure de gestion des données. L'implication depuis l'été 2020 d'un nouvel ingénieur dans l'équipe (Olivier Sirol) a fortement contribué à plusieurs évolutions positives : virtualisation des machines et amélioration du « dataflow ».

Suivi et pérennisation de la diffusion des produits dérivés mis en place par l'observatoire, en particulier concernant les informations sur les séismes récents. Celles-ci sont diffusées sur le compte twitter @geoscope_ipgp à près de 2600 abonnés, soit 400 de plus que l'année passée.

 **En savoir plus / Read more:**
> geoscope.ipgp.fr



After these validations, the first STS6A sensor of the GEOSCOPE network has been installed in Senegal.

Improvement of the data infrastructure and management: the arrival in our team of a new engineer (Olivier Sirol) strongly contributed to several positive evolutions: machine virtualization and dataflow improvement.

Improvement of the dissemination of the derived products developed by the Observatory, in particular for the rapid information about recent earthquakes. We now have close to 2600 subscribers to our twitter account @geoscope_ipgp, about 400 more than last year.



Vue acquise par drone du banc de galets étudié dans la rivière de Vieux Habitants, en Guadeloupe. Le banc a une largeur maximum de 25 m, le Nord est à gauche de la photo. On distingue au centre du banc des blocs rocheux de plus de 2 m de diamètre. La taille et l'abondance des blocs rendent cette zone idéale pour l'étude du transport des sédiments dans les rivières.
View acquired by drone of the pebble bank studied in the Vieux Habitants river, Guadeloupe. The bank has a maximum width of 25 m, the North is on the left of the picture. In the centre of the bank, one can see boulders of more than 2 m in diameter. The size and abundance of the boulders make this area ideal for the study of sediment transport in rivers.
© IGP



Observatoire OBSERA
OBSERA observatory

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 d'ObsERA.

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 ObsERA website.

Transport et dépôt des galets dans les rivières

Transport and deposit of pebbles in rivers

Bien que les rivières jouent un rôle primordial dans le transfert de masse des reliefs jusqu'à l'océan, le transport de sédiments en leur sein est encore aujourd'hui très mal contraint. Selon quelle dynamique une rivière transporte-t-elle les galets qui composent son lit ? Comment ce transport influence-t-il la distribution de taille de ces galets ? Pour répondre à ces questions, l'observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles (ObsERA) a développé une méthode permettant de suivre dans la durée l'évolution du lit d'une rivière grâce à l'acquisition d'images haute résolution par un drone. Des images sont ainsi obtenues chaque année depuis 11 ans d'un tronçon du lit de la rivière de Vieux-Habitants, en Guadeloupe. Le traitement d'image permet d'identifier, le long de ce tronçon de 200 m de long, chaque galet de taille supérieure à 50 cm. Cette approche permet de mesurer les quantités de sédiments déposés ou, au contraire, entraînés entre deux années successives. L'analyse des résultats, couplée à des mesures de débit, révèle trois résultats majeurs :

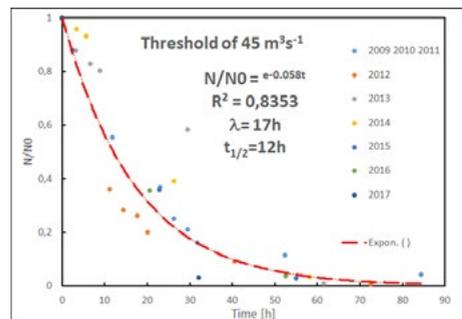
- le transport de galets, très intermittent, se concentre pendant des crues, dont la durée totale n'excède pas une dizaine d'heures par an,
- malgré son caractère intermittent, le transport ne modifie pas la distribution de tailles des galets, qui reste la même d'une année à l'autre,
- marquer un certain nombre de galets permet de définir une population de traceurs ; les données montrent que le nombre d'individus de cette population décroît exponentiellement avec le temps effectif de transport, défini comme la durée pendant laquelle la rivière est au-dessus du seuil de transport. Cette dernière observation, compatible avec les modèles théoriques de transport développés à l'IPGP, permet d'estimer le temps de résidence des sédiments sur le lit de la rivière.

Rivers shape landscapes by transporting sediment from continents to the ocean. Yet the dynamics of sediment transport in rivers is still poorly understood. How does a river transport the pebbles that make up its bed? How does this transport influence the size distribution of these pebbles? To address these questions, the Observatory of Water and Erosion in the Antilles (ObsERA) has developed a method to monitor sediment transport in a river bed, based on the regular acquisition of high resolution images with a drone. For the past 11 years, images have been acquired of the same reach of the river bed of Vieux-Habitants, in Guadeloupe. The image processing enables the identification, along this 200 m long section, of each pebble larger than 50 cm. This approach makes it possible to measure the quantities of sediment deposited or, on the contrary, dragged between two successive years. Analysis of the results, coupled with flow measurements, reveals three major findings:

- the transport of pebbles is highly intermittent and concentrates, during floods, the total duration of which does not exceed ten hours each year,
- despite its intermittent nature, sediment transport does not modify the size distribution of the pebbles, which remains the same from one year to the next,
- marking a certain number of pebbles makes it possible to define a tracer population. The data show that the number of individuals in this population decreases exponentially with the effective transport time, defined as the time during which the river is above the transport threshold. This last observation, compatible with a theory developed at the IPGP, allows for the estimation of the residence time of sediments on the river bed.



En savoir plus / Read more:
> webobsera.ipgp.fr



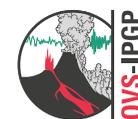
a) Zone d'étude sur la rivière de Vieux-Habitants, en Guadeloupe. Le lit de la rivière est constitué de blocs et galets arrondis dont le diamètre dépasse souvent 50 cm. **b)** Décroissance d'une population de galets traceurs en fonction du temps effectif de transport.

a) Study area on the Vieux-Habitants River in Guadeloupe. The river bed is made up of rounded blocks and pebbles, often with a diameter of more than 50 cm. **b)** Decrease in the population of tracer pebbles as a function of the effective transport time.

© IPGP



© OVPF-IPGP



Observatoires volcanologiques et sismologiques

Volcanological and seismological observatories

L'IPGP est en charge de la surveillance des quatre volcans actifs français situés outre-mer, ainsi que de la sismicité régionale et des risques potentiels associés de tsunamis, à travers ses observatoires volcanologiques et sismologiques en Guadeloupe, à la Martinique et à La Réunion, qui a aussi la charge de la surveillance opérationnelle de l'activité sous-marine à Mayotte (REVOSIMA). Leurs missions, 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 Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) de l'Université Clermont Auvergne, sont i) d'observer et étudier les phénomènes volcaniques dans leur contexte sismo-tectonique, ii) de constituer des bases

The IPGP is in charge of monitoring the four active French volcanoes located in overseas territories, as well as regional seismicity and potential tsunami risks, through its volcanological and seismological observatories in Guadeloupe, in Martinique, and on Reunion Island, which is also in charge of the operational monitoring of the underwater activity in Mayotte (REVOSIMA). Their missions, carried out within the framework of the National Service for Volcanological Observations (SNOV), in partnership with the Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (OPGC) and the Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) of the University of Clermont Auvergne, are i) to observe and study volcanic phenomena in their seismic-tectonic context, ii) to build up multi-parameter



© OVVPF-IPGP

de données multi-paramètres mises à la disposition de la communauté scientifique par les portails nationaux et européens (RESIF, EPOS) et iii) de 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 société civile.

Cette année a bien évidemment été très particulière pour les observatoires volcanologiques et sismologiques du fait de la crise sanitaire. Un plan de continuité d'activité a été mis en œuvre afin de maintenir les opérations de surveillance en télétravail tout en autorisant les interventions sur le terrain en cas de situations critiques.

databases available to the scientific community through national and European portals (RESIF, EPOS), and iii) to detect any change in the dynamics of seismo-volcanic systems and regional seismicity in order to inform and possibly alert the authorities in charge of civil protection and civil society.

This year was obviously very particular for the volcanological and seismological observatories due to the health crisis. A business continuity plan was implemented in order to maintain monitoring operations through remote work while allowing interventions in the field in case of critical situations.

Activité sismique et volcanique en 2020 Seismic and volcanic activity in 2020

Depuis quelques années, la France fait face à une situation inédite avec la réactivation de La Soufrière de Guadeloupe, en cours depuis 1992 et tout particulièrement depuis 2018, celle de la Montagne Pelée à la Martinique depuis le printemps 2019 et notamment depuis novembre 2020, l'occurrence de plusieurs

In recent years, France has been facing an unprecedented situation with the reactivation of La Soufrière in Guadeloupe, which has been ongoing since 1992 and especially since 2018, the reactivation of Mount Pelée in Martinique since spring 2019 and especially since November 2020, the occurrence of several eruptions

éruptions par an du Piton de la Fournaise à La Réunion et enfin une éruption sous-marine majeure en cours à Mayotte depuis mai 2018 ayant conduit à la formation d'un nouveau volcan à 50 km à l'est de Mayotte et à l'émission de près de 6 km³ de lave.

Cette année encore, le Piton de La Fournaise a été très actif avec trois éruptions localisées à l'intérieur de la caldeira de l'Enclos-Fouqué, hors des zones habitées, ainsi que trois intrusions n'ayant pas débouché sur une activité de surface. L'éruption du 2 au 6 avril 2020 a été l'occasion pour l'OVVPF-IPGP de valider sa capacité à gérer une crise volcanique à distance avec des réseaux de surveillance entièrement télétravaillés, sans aucune mesure de terrain complémentaire au niveau du site éruptif du fait des contraintes liées à la crise sanitaire.

À Mayotte, l'éruption s'est poursuivie au minimum jusqu'au 20 octobre 2020, avec plus d'1,45 km³ de magma produit en 12 mois, pour un total de 6,55 km³ depuis le début de l'éruption en juin 2018. L'IPGP a co-dirigé trois campagnes océanographiques (MAYOBS 13-1, MAYOBS 13-2, MAYOBS 15) parmi les six organisées par le REVOSIMA en 2020. Les campagnes MAYOBS 17 et SISMAORE sur le navire « Pourquoi pas ? » ont permis l'identification de nouvelles coulées de lave ayant été émises entre le 20 octobre et fin janvier 2021. Les déplacements de surface mesurés depuis le début de la crise par les stations GPS de Mayotte indiquent un

per year of Piton de la Fournaise on Reunion Island, and lastly, a major underwater eruption underway in Mayotte since May 2018, which has led to the formation of a new volcano 50 km east of Mayotte and the emission of almost 6 km³ of lava.

Again this year, Piton de La Fournaise was very active with three eruptions inside the Enclos Fouqué caldera, outside inhabited areas, as well as three intrusions that did not lead to surface activity. The eruption from 2 to 6 April 2020 was an opportunity for the OVVPF-IPGP to confirm its ability to manage a volcanic crisis remotely with fully tele-metered monitoring networks, without any additional field measurements at the eruption site due to the constraints related to the health crisis.

In Mayotte, the eruption continued at least until 20 October 2020, with more than 1.45 km³ of magma produced in 12 months, for a total of 6.55 km³ since the beginning of the eruption in June 2018. The IPGP co-led three oceanographic campaigns (MAYOBS 13-1, MAYOBS 13-2, MAYOBS 15) among the six organised by REVOSIMA in 2020. The MAYOBS 17 and SISMAORE campaigns on the ship "Pourquoi pas?" allowed the identification of new lava flows that were emitted between 20 October and late January 2021. The surface displacements measured since the beginning of the crisis by the GPS stations in Mayotte indicate an overall eastward movement of about 21 to 25 cm and a subsidence of



mouvement d'ensemble vers l'Est d'environ 21 à 25 cm et un affaissement (subsidence) d'environ 10 à 19 cm selon leur localisation sur l'île. Cependant, ces déplacements ralentissent depuis avril-mai 2019 et sont désormais très faibles. À l'inverse, les panaches acoustiques et émissions de fluides (CO_2 , CH_4) dans la colonne d'eau à partir de sites sous-marins situés dans la structure du Fer à Cheval, 10 km à l'Est de Petite-Terre et dans la zone de l'essaim sismique proximal, se sont intensifiés.

En Guadeloupe, le système volcanique de la Soufrière reste dominé en 2020 par une dynamique cyclique de recharge et décharge d'énergie liée à l'infiltration de gaz magmatiques profonds dans le système hydrothermal. Cela engendre un processus récurrent de surchauffe et de surpression des fluides hydrothermaux en ébullition, dont les valeurs de pression et de température approchent celles du point critique de l'eau. Ces accumulations et dissipations énergétiques avaient atteint un pic lors de la forte activité sismique et fumarolienne de mars-avril 2018. L'OVSG-IPGP a continué d'enregistrer une intense dynamique sismique du système hydrothermal de la Soufrière, marquée par la reprise des essaims (20) et l'identification d'au moins 8 610 séismes volcaniques de faible à très faible énergie localisés jusqu'à 3 km sous la surface. Ces observations sont en accord avec les signaux

about 10 to 19 cm depending on their location on the island. However, these movements have been slowing down since April-May 2019 and are now very weak. Conversely, acoustic plumes and fluid emissions (CO_2 , CH_4) in the water column from underwater sites located in the Fer à Cheval structure, 10 km east of Petite-Terre and in the proximal seismic swarm area, have intensified.

In Guadeloupe, the La Soufrière volcanic system remained dominated in 2020 by a cyclic dynamic of energy recharge and discharge linked to the infiltration of deep magma gases into the hydrothermal system. This generates a recurrent process of overheating and overpressure of the boiling hydrothermal fluids, the pressure and temperature values of which approach the critical point of water. These energy accumulations and dissipations had peaked during the strong seismic and fumarole activity of March-April 2018. The OVSG-IPGP continued to record intense seismic dynamics of the La Soufrière hydrothermal system, marked by the resumption of swarms (20) and the identification of at least 8,610 low-to very low-energy volcanic earthquakes located up to 3 km below the surface. These observations are consistent with the deformation signals (GNSS and extensometry) which show that inflation remains limited to the dome, as well as the progression of fracture opening within it,



© Beauducel, IPGP



© IPGP

de déformation (GNSS et extensométrie) qui témoignent d'une inflation restant limitée au dôme, ainsi que de la progression de l'ouverture des fractures en son sein qui s'est accélérée à partir de la mi-2020. Les flux de gaz fumaroliens sont restés élevés.

En Martinique, l'augmentation de la sismicité volcanique de la Montagne Pelée débutée au printemps 2019 s'est amplifiée à partir de novembre 2020, ce qui a conduit au passage en vigilance jaune (lire l'entretien avec Fabrice R. Fontaine p.56-59). Ces nombreux séismes, localisés sous la Montagne Pelée, essentiellement jusqu'à 4 km de profondeur, n'ont pas été ressentis par la population. Aucune déformation significative des flancs du volcan n'a pour l'instant été détectée qui pourrait être associée à une intrusion ou à un déplacement de magma en profondeur. Une zone de végétation dégradée, qui pourrait résulter d'un dégazage volcanique diffus à travers le sol, a été observée sur le flanc Sud-Ouest du volcan entre la haute rivière Claire et la rivière Chaude. En 2020, de nombreux éboulements de la falaise Samperre ont été enregistrés, ainsi que 6 coulées torrentielles dans la rivière du Prêcheur. Ils ont conduit à plusieurs reprises au déclenchement du système d'alerte provoquant l'évacuation de la population par les autorités.

which accelerated from mid-2020. Fumaronitic gas flows remained high.

In Martinique, the increase in volcanic seismicity on Mount Pelée, which began in spring 2019, increased from November 2020 onwards, leading to a yellow alert (read the interview with Fabrice R. Fontaine p.56-59). These numerous earthquakes, located under Mount Pelée, essentially up to 4 km deep, were not felt by the community. No significant deformation of the volcano's flanks has yet been detected that could be associated with an intrusion or a displacement of magma at depth. An area of degraded vegetation, which could be the result of diffuse volcanic degassing through the soil, has been observed on the southwestern flank of the volcano between the upper Claire River and the Chaude River. In 2020, numerous landslides from the Samperre cliff were recorded, as well as 6 torrential flows in the Prêcheur River. These have resulted in the alert system being triggered on several occasions, causing the authorities to evacuate the population.



Progrès réalisés en 2020 dans les réseaux d'observation Progress in observation networks in 2020

En Martinique, suite à la détection de signaux suggérant une augmentation de l'activité de la Montagne Pelée une modernisation et un renforcement du réseau sismologique et géodésique ont débuté sur la Montagne Pelée. De plus, la mise en place de protocoles de détection automatique de la sismicité volcanique reposant sur la reconnaissance de familles de séismes a permis d'optimiser et d'affiner l'analyse des localisations des sources sismiques.

En Guadeloupe, la seconde phase d'un projet de surveillance multi-paramètres (thermique, sismique) reposant sur des technologies optiques a débuté. Suite à l'installation en 2019 par l'IPGP et l'ESEO d'un sismomètre optique au sommet de La Soufrière (voir aussi le highlight #1, p 36-37), une première mission a eu lieu en février 2020 pour déployer une fibre optique (1,7 km) dédiée à la mesure du gradient de température en surface au sommet de la Soufrière. La fibre est utilisée comme capteur thermique en utilisant la technologie DTS (Distributed Thermal Sensor) qui permet de réaliser plusieurs milliers de mesures le long de la fibre. Ces mesures vont compléter

In Martinique, following the detection of signals suggesting an increase in activity on Mount Pelée, a modernisation and reinforcement of the seismological and geodetic network on Mount Pelée has begun. In addition, the implementation of protocols for the automatic detection of volcanic seismicity based on the recognition of families of earthquakes has made it possible to optimise and refine the analysis of the location of seismic sources.

In Guadeloupe, the second phase of a multi-parameter (thermal, seismic) monitoring project based on optical technologies has begun. Following the installation in 2019 by the IPGP and ESEO of an optical seismometer on the summit of La Soufrière (see also highlight #1, p.36-37), a first mission took place in February 2020 to deploy a fibre optic cable (1.7 km) dedicated to measuring the surface temperature gradient on the summit of La Soufrière. The fibre is employed as a thermal sensor using Distributed Thermal Sensor (DTS) technology, which allows several thousand measurements to be made along the cable. These measurements will complement the efforts of the OVSG-IPGP, which continued this year to develop the

les efforts de l'OVSG-IPGP qui a poursuivi cette année le développement de la quantification du flux thermique par la mise en œuvre de campagnes d'acquisition d'images thermiques aéroportées (hélicoptère de la Sécurité Civile ou drone), et par des stations innovantes pour enregistrer et télétransmettre quotidiennement l'émission de plusieurs gaz volcaniques dans les fumerolles sommitales (CO_2 , SO_2 , H_2S).

À La Réunion, l'OVPF-IPGP a poursuivi la préparation d'une extension du réseau sismique et GNSS afin d'améliorer la surveillance d'éruptions potentielles sur les flancs latéraux du volcan, en dehors de l'Enclos Fouqué, qui pourraient menacer les zones habitées. De plus, l'observatoire a développé de nouveaux capteurs de gaz miniatures aéroportés par drone et a poursuivi son solide partenariat avec l'OPGC-LMV 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.

À Mayotte, l'OVPF-IPGP a débuté en 2020 la prise en charge de la surveillance opérationnelle du REVOSIMA avec la mise en place d'astreintes, l'organisation d'un point hebdomadaire avec le comité scientifique du REVOSIMA, l'envoi de communiqués en cas de séisme ressenti et d'un bulletin mensuel. Les équipes de l'OVPF-IPGP ont installé en novembre une station de surveillance en continu du flux de CO_2 du sol en plus d'une campagne de mesure du dégazage du CO_2 sur l'île de Petite-Terre. Des missions de maintenance des réseaux ont aussi été effectuées à Mayotte et sur l'île de Grande Glorieuse dans les Îles Éparses, avec le concours des TAAF et des FAZOI. En outre, une mission à Mayotte a permis aux scientifiques de tester le dispositif de mesure sismique sur fibre optique (Distributed acoustic Sensors) grâce à un câble sous-marin de télécommunications mis à disposition par le consortium Fly-Lion3 dans le cadre d'une convention avec l'IPGP, avec l'aide d'Orange câble.

Enfin, l'IPGP met désormais à disposition du grand public la localisation en temps réel de tous les séismes enregistrés, localisés et validés par les quatre observatoires, y compris ceux d'origine volcanique. Ces données sont transmises au Bureau central de sismologie français (BCSF) du Réseau national de surveillance sismologique (RENASS: <https://renass.unistra.fr/fr/zones>).

quantification of the heat flux by implementing airborne thermal image acquisition campaigns (Civil Security helicopters or drones), and by using innovative stations to record and teletransmit daily the emission of several volcanic gases in the summit fumaroles (CO_2 , SO_2 , H_2S).

On Reunion Island, the OVPF-IPGP continued to prepare an extension of the seismic and GNSS network to improve monitoring of potential eruptions on the lateral flanks of the volcano, outside the Enclos Fouqué, which could threaten inhabited areas. In addition, the observatory developed new miniature airborne gas sensors by drone and continued its strong partnership with OPGC-LMV for satellite radar monitoring of volcano deformation, as well as for modelling the spatio-temporal evolution of eruptive flow and propagation of active lava flows during an eruption, in order to contribute to crisis management.

In Mayotte, the OVPF-IPGP began to take charge of the operational monitoring of REVOSIMA in 2020, with the setting up of on-call shifts, the organisation of a weekly update with the REVOSIMA scientific committee, and the sending of communiqués in the event of an earthquake being felt, and of a monthly bulletin. In November, the OVPF-IPGP teams installed a station for continuous monitoring of CO_2 flux from the ground in addition to a campaign to measure CO_2 degassing on the island of Petite-Terre. Network maintenance missions were also carried out in Mayotte and on the island of Grande Glorieuse in the Îles Éparses, the Scattered Islands in the Indian Ocean, with the assistance of the TAAF and FAZOI. In addition, a mission to Mayotte enabled scientists to test the seismic measurement device on fibre optic cable (Distributed Acoustic Sensors) thanks to a submarine telecommunications cable made available by the Fly-Lion3 consortium under an agreement with the IPGP, with the help of Orange Cable.

Lastly, the IPGP now makes available to the general public the real-time location of all earthquakes recorded, located and confirmed by the four observatories, including those of volcanic origin. These data are transmitted to the French Central Seismological Office (BCSF) of the National Seismological Monitoring Network (RENASS: <https://renass.unistra.fr/fr/zones>).



En savoir plus / Read more:
> www.ipgp.fr/ovs



Centre de données de l'IPGP (CD-IPGP) IPGP Data Center (IPGP-DC)

Le centre de données assure la gestion et la mise à disposition des données d'observation de l'IPGP pour la communauté scientifique. Il est responsable de leur archivage, leur stockage à long terme (protection renforcée) et leur diffusion dans des formats et interfaces standards. Il est également chargé de l'interconnexion avec des services nationaux (Résisf-EPOS et ForM@Ter), européen (EPOS) et mondiaux (FDSN et Planetary Data System de la NASA). En outre, il est responsable de la déclaration des DOI (Digital Object Identifier) associés aux réseaux de données IPGP.

Le CD-IPGP gère les données (sismologiques, GNSS, volcanologiques) de 6 réseaux d'observation : GEOSCOPE (G), l'observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe (GL), l'observatoire volcanologique et sismologique de Martinique (MQ), l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (PF), le réseau sismologique français des Antilles (WI) et l'observatoire martien InSight (XB 2016-2022).

En 2020, le CD-IPGP a été mandaté par la direction pour créer un entrepôt de données pour la préservation, la diffusion et la valorisation des données issues des activités de recherche de l'IPGP, en facilitant leur identification et leur citation.

L'équipe se compose de quatre personnes (un chercheur et 3 ingénieurs), avec un support administratif assuré par deux gestionnaires et travaille en étroite collaboration avec les observatoires de l'IPGP, la plateforme S-CAPAD et le service informatique de l'IPGP. Les membres du CD-IPGP font partie des réseaux d'ingénieurs de Résisf et de ForM@Ter.

Réalisations marquantes en 2020 Achievements in 2020

> Mise en préproduction des webservices d'accès aux données GNSS (plateformes GSAC et GLASS). Le CD-IPGP est un des nœuds de distribution de données GNSS dans EPOS.

> Création d'un entrepôt pour les données des publications scientifiques associées à InSight.

The main mission of the IPGP Data Center is to manage and distribute to the scientific community the observation data of the IPGP. It is responsible for data archiving data, long-term curation (enhanced protection) and data distribution through standard formats and interfaces. It is also responsible for interconnection with national (Résisf-EPOS and ForM@Ter), European (EPOS) and global (FDSN and NASA's Planetary Data System) services. In addition, it is responsible for the declaration of DOIs (Digital Object Identifiers) associated with the IPGP data networks.

The IPGP-DC manages the data (seismological, GNSS, volcanological) of 6 observatory networks: GEOSCOPE (G), the Volcanological and seismological observatory of Guadeloupe (GL), the Volcanological and seismological observatory of Martinique (MQ), the Piton de la Fournaise volcanological observatory (PF), the French seismological network of the Antilles (WI) and the InSight martian observatory (XB 2016-2022).

In 2020, the IPGP-DC was mandated by the IPGP management to create a data repository for the preservation, dissemination and valorization of data resulting from the IPGP research activities, by facilitating their identification and citation.

The team consists of 4 people (one researcher and 3 engineers), with an administrative support provided by 2 managers and works in close collaboration with the IPGP observatories, the S-CAPAD platform and the IPGP IT department. The IPGP-DC team is part of the Résisf and ForM@Ter networks of engineers.

> Pre-release of GNSS data access web services (GSAC and GLASS platforms). The IPGP-DC is one of the GNSS data distribution nodes in EPOS.

> Creation of a data repository for scientific publications associated with InSight.

> Mise en production du webservice « fdsnws-event » pour l'accès aux catalogues de sismicité des observatoires aux Antilles et du Piton de la Fournaise.

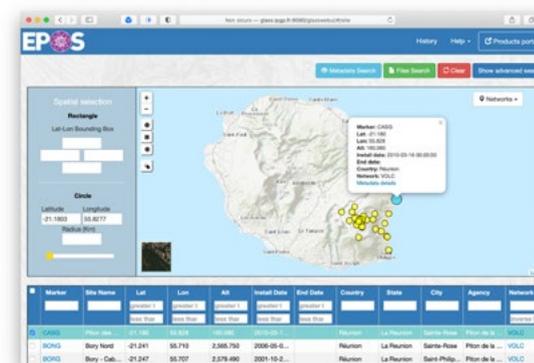
> Participation à la spécification de la documentation du format de description des données sismologiques (métadonnées) FDSN StationXML (en représentation de Résisf-EPOS).

> Participation au projet YASMINE (coopération entre IRIS et Résisf-EPOS) pour la réalisation d'un éditeur de métadonnées au format FDSN StationXML. L'outil, destiné à la communauté sismologique internationale, a été livré fin 2020.

> Dans le cadre de la nouvelle mission de mise en place d'un service d'entrepôt des données de la recherche, le CD-IPGP a entamé la définition d'un plan de gestion de données pour l'IPGP (basé sur la plateforme OPIDoR du CNRS) et l'implémentation d'un système pour la préservation, distribution et valorisation de ces données basé sur la technologie « Dataverse ». La mise en production est prévue courant 2021.

> Participation à la rédaction du projet Equipex+ « GAIA Data », retenu par le PIA 3, avec un financement demandé de 19,6 M€. Ce projet, porté par le CNRS, vise à la création d'une infrastructure distribuée de données et de services pour l'observation, la modélisation et la compréhension du système Terre, de la biodiversité et de l'environnement. Le projet GAIA Data est coordonné à l'IPGP par Claudio Satriano et implique les équipes du CD-IPGP, S-CAPAD et ForM@Ter.

> Dans l'objectif de familiariser les utilisateurs de données avec les webservices proposés par le CD-IPGP, une formation sur l'accès aux données sismologiques a été donnée en janvier 2020. D'autres formations suivront en 2021.



Interface web du système GLASS pour la mise à disposition des données et métadonnées GNSS.
Web interface for the GLASS system, for distributing GNSS data and metadata.



Exemple d'entrepôt de données (avec DOI) associées à un article scientifique InSight.
Example of a data repository (with DOI) for a InSight scientific paper.

> Release of the "fdsnws-event" web service for accessing the seismicity catalogs of the Antilles and Piton de la Fournaise observatories.

> Participation (representing Résisf-EPOS) in the specification of the documentation of the FDSN StationXML seismological data description format.

> Participation in the YASMINE project (cooperation between IRIS and Résisf-EPOS) for the creation of a metadata editor in FDSN StationXML format. The tool, intended for the international seismological community, was delivered at the end of 2020.

> As part of the new mission to set up a research data repository service, the IPGP-DC has started to define a data management plan for the IPGP (based on the CNRS OPIDoR platform) and the implementation of a system for the preservation, distribution and valorization of these data based on the "Dataverse" technology. Release is scheduled for 2021.

> Participation in the drafting of the Equipex+ "GAIA Data" project, selected by the PIA 3, with requested funding of € 19.6 million. This project, led by the CNRS, aims to create a distributed infrastructure of data and services for the observation, modeling and understanding of the Earth system, biodiversity and the environment. The GAIA Data project is coordinated at the IPGP by Claudio Satriano and involves teams from the IPGP-DC, S-CAPAD and ForM@Ter.

> In order to familiarize data users with the webservices offered by the IPGP-DC, training on access to seismological data was given in January 2020. Other training will follow in 2021.

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. 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. ForM@Ter comporte une structure opérationnelle, son centre de coordination et de diffusion (CCD), basée au sein du département des observatoires de l'IPGP. Il fédère des centres de données et de services (CDS) ainsi que des centres d'expertise scientifique (CES) en France.

The objectives of the ForM@Ter national data and services center are to ease access to spatial, in-situ and experimental data from the Solid Earth domain and to contribute to the creation of products and services based on these data. Part of the national and European frameworks, it is a component of the national research infrastructure Data Terra dedicated to data on the entire Earth system. ForM@Ter has an operational structure, its Coordination and Dissemination Centre (CCD), based at the IPGP within the Observatories Department. It federates Data and Service Centers (CDS) as well as Scientific Expertise Centers (CES) in France.

Principales réalisations en 2020

Main achievements in 2020

Structuration du pôle

La convention constitutive du pôle ForM@Ter a été signée en 2020 par 13 parties prenantes : CNRS, CNES, IPGP, BRGM, SHOM, IGN, IRD, Observatoire de Paris, Observatoire de la Côte d'Azur, Université de Toulouse, Université de Grenoble, Université Clermont-Auvergne et Université de Strasbourg.

Projet Equipex + GAIA-DATA

Ce projet porté par 3 infrastructures de recherche nationales traitant du numérique, dont Data Terra, vise à développer et mettre en œuvre une infrastructure intégrée de données et de services distribuées pour l'observation, la modélisation et la compréhension du système Terre, de la biodiversité et de l'environnement. Composante de Data Terra, ForM@Ter a activement participé à la rédaction du projet en liaison étroite avec différentes équipes et notamment S-CAPAD et le centre de données à l'IPGP, qui fait partie des 8 centres ossatures du projet. Le projet, a été classé A+ et sera financé.

Finalisation de services de calcul basé sur l'imagerie
6 services de calcul ont été finalisés et pour certains la phase de test est terminée. Ils seront disponibles au cours de l'année 2021 via le portail de ForM@Ter.

Structuring of the pole

ForM@Ter's constitutive convention was signed in 2020 by 13 stakeholders: CNRS, CNES, IPGP, BRGM, SHOM, IGN, IRD, Paris Observatory, Côte d'Azur Observatory, University of Toulouse, University of Grenoble, University of Clermont-Auvergne, University of Strasbourg.

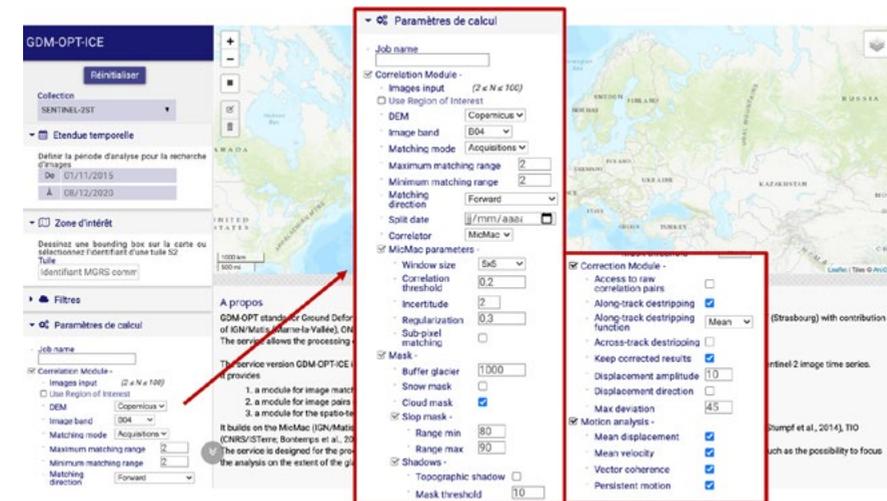
Equipex + GAIA-DATA Project

This project, led by 3 National Research Infrastructures dealing with digital technology, including Data Terra, aims to develop and implement an integrated infrastructure of distributed data and services for the observation, modeling and understanding of the Earth system, biodiversity and the environment.

As a component of Data Terra, ForM@Ter has actively participated in the drafting of the project in close liaison with various teams and in particular S-CAPAD and the Data Center at IPGP, which is one of the 8 centers of the project. The project has been classified A+ and will be funded.

Finalization of processing services based on satellite imagery

6 processing services have been finalized and for some of them the test phase has been completed. They will be available during the year 2021 via the ForM@Ter portal.



Interface utilisateur du service de calcul à la demande GDM-ICE. User interface of the on-demand calculation service GDM-ICE.

> Ground Deformation Monitoring (GDM)

- **GDM-SAR** : en cours de finalisation. Ce service de calcul à la demande de déformation du sol à partir de données satellites radar est une contribution à l'infrastructure européenne EPOS.
- **GDM-Optic** : phase de test terminée. Ce service de calcul à la demande de déformation du sol à partir d'images satellitaires optiques comporte 3 services dédiés à la tectonique, à la cryosphère et aux glissements de terrain : GDM-ETQ, GDM-ICE, GDM-SLIDE. GDM-ETQ est une contribution à EPOS.

> Ground Deformation Monitoring (GDM)

- **GDM-SAR**: under finalization. This on-demand ground deformation processing service based on satellite radar data is a contribution to the European EPOS infrastructure.
- **GDM-Optic**: test phase over. This on-demand computation service of ground deformation from optical satellite images includes 3 services dedicated to tectonics, cryosphere and landslides: GDM-ETQ, GDM-ICE, GDM-SLIDE. GDM-ETQ is a contribution to EPOS.

> Production de modèles numériques de surface (MNS)

Génération automatique et évaluation de la qualité intrinsèque de MNS à partir d'images optiques stéréoscopiques. Contribution inter-pôles, ForM@Ter-Théia avec le dispositif transversal DINAMIS de Data Terra. La phase de test a débuté en janvier 2021 avec une quarantaine de bêta-testeurs.

> Production of digital surface models (DSM)

Automatic generation and evaluation of DSM intrinsic quality from stereoscopic optical images. Inter-pole contribution, ForM@Ter-Theia with Data Terra's DINAMIS transversal infrastructure. The test phase started in January 2021 with about 40 beta testers.

> FLATSIM (ForM@Ter Large-scale multi-Temporal Sentinel-1 Interferometry processing chain in Muscate)

calcul systématique de séries d'interferogrammes sur de grandes zones géographiques. Le calcul HPC est porté par le CNES.

systematic calculation of series of interferograms over large geographical areas. The HPC calculation is supported by the CNES.

Un appel à idées a été lancé au printemps 2020 pour définir les zones géographiques cibles. 8 projets ont été retenus : Tibet Est et Nord-Ouest, Balkans, Turquie, Andes, Rifts Afar et Okavango, bassin du Mississipi (surfaces minimum couvertes > 250 000 km²).

A call for ideas has been launched in spring 2020 to define the target geographical areas. 8 projects have been selected: Eastern and North-Western Tibet, Balkans, Turkey, Andes, Afar and Okavango Rifts, Mississippi basin (minimum area covered > 250 000 km²).

Les premiers produits sur le Tibet ont été générés et seront accessibles via le métacatalogue de ForM@Ter.

The first products on Tibet have been generated and will be accessible via the ForM@Ter meta-catalogue.



En savoir plus / Read more:

> www.poleterresolide.fr

> www.data-terra.org

70 ans de surveillance de la Soufrière par l'OVSG-IPGP : 1950-2020 70 years of monitoring La Soufrière by the OVSG-IPGP: 1950-2020

L'observation pérenne de la Soufrière de Guadeloupe débute le 21 mars 1950 avec l'achat de la propriété du Parnasse, située au pied du volcan, sur les hauteurs de la commune de Saint-Claude, à Basse-Terre. Base avancée de l'IPGP, le Laboratoire de physique du globe est né. Sa proximité avec le volcan lui permet alors de développer un véritable travail de terrain. Pour mener à bien sa mission de surveillance, deux sismographes Mainka sont installés au sein de l'observatoire. L'enregistrement s'effectue dans une seule direction, sur un rouleau de papier recouvert de noir de fumée. Deux appareils sont donc nécessaires, disposés à angle droit, pour avoir un aperçu complet des mouvements horizontaux du sol.

En 1956, l'observatoire enregistre ses premiers signaux précurseurs d'éruption. Après près de quatre mois de sismicité anormale, la Soufrière entre en éruption phréatique le 20 octobre. Cette crise mineure dure quatre jours, avec deux éruptions en surface. Environ 100 000 m³ de matériaux sont éjectés, avec

Permanent monitoring of Guadeloupe's La Soufrière volcano began on March 21, 1950 with the purchase of the Parnasse property, located at the foot of the volcano, in the heights of the commune of Saint-Claude in Basse-Terre. As a forward base for the IPGP, the Earth Physics Laboratory was born. Its proximity to the volcano allowed it to develop real field work. To monitor the volcano, two Mainka seismographs were installed in the observatory. The recordings were taken in one direction only, on a roll of paper covered with black smoke. Two devices were therefore needed, arranged at right angles, to get a complete picture of the horizontal movements of the ground.

In 1956, the observatory recorded its first precursor signals of eruption. After nearly four months of abnormal seismicity, La Soufrière erupted on October 20th. This minor crisis lasted four days, with two surface eruptions. About 100,000 m³ of material were ejected, with ash deposits of 3 to 5 cm. Following this eruption, the



© Beauducel, IPGP

3 à 5 cm de dépôt de cendres. Suite à cette éruption, l'observatoire installe, la même année, des sismographes électromagnétiques, plus précis et beaucoup moins volumineux.

Cette première étape marque le début de la mise en place d'un véritable réseau sismique à partir de 1964. Les stations de mesures, disséminées sur le volcan, sont reliées par câble au laboratoire. Ce dernier fait alors peau neuve à cette époque avec une rénovation complète de ses bâtiments. En 1975, certaines stations se dotent de la télétransmission, permettant un envoi des mesures sismiques au laboratoire par ondes radio.

La Soufrière entre de nouveau en éruption en juillet-août 1976. Très médiatisée, cette crise mène à l'évacuation de la région Saint-Claude / Basse-Terre et à l'installation de l'observatoire au Fort Saint-Charles (actuel Fort Delgrès). Le matériel de surveillance y restera pendant 17 ans, tandis que le laboratoire de géochimie et l'administration retournent au Parnasse dès la fin de l'éruption. Un lien fort subsiste encore aujourd'hui entre l'observatoire et le fort, lequel accueille dans ses locaux une exposition permanente sur cet épisode mémorable de 1976. Suite à cette éruption historique, le site du Parnasse est remis en question du fait de sa proximité immédiate avec le volcan. En 1989 débute alors la construction d'un observatoire moderne au sommet du Houëlmont, situé à 8,3 km au Sud-Ouest de la Soufrière. Cet emplacement privilégié, à vue du volcan, facilite la réception des données par transmission radio. Le nouvel observatoire est inauguré le 15 décembre 1993, puis rebaptisé en « Observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe (OVSG) » en 2001 par l'IPGP, en raison de son implication toujours plus importante dans le domaine de la sismologie et des recherches liées au risque sismique régional.

observatory installed electromagnetic seismographs the same year, which were smaller and more precise.

This first step marked the beginning of the establishment of a real seismic network from 1964. The measuring stations, scattered around the volcano, were connected to the laboratory by cable. At that time, the laboratory underwent a complete renovation of its buildings. In 1975, some stations were equipped with remote transmission, allowing seismic measurements to be sent to the laboratory by radio.

La Soufrière erupted again in July-August 1976. This crisis, which received a lot of media attention, led to the evacuation of the Saint-Claude/Basse-Terre region and the installation of the observatory at Fort Saint-Charles (now Fort Delgrès). The monitoring equipment remained there for 17 years, while the geochemistry laboratory and administration returned to Parnasse as soon as the eruption was over. A strong link still exists between the observatory and the fort, which hosts a permanent exhibition on this memorable episode from 1976. Following this historic eruption, the Parnasse site came under question due to its immediate proximity to the volcano. In 1989, the construction of a modern observatory began at the summit of Houëlmont, located 8.3 km southwest of La Soufrière. This prime location, within sight of the volcano, facilitated the reception of data by radio transmission. The new observatory was inaugurated on December 15, 1993, then renamed "Volcanological and Seismological Observatory of Guadeloupe (OVSG)" in 2001 by the IPGP due to its increasing involvement in the field of seismology and research related to regional seismic risk.



La faille du 30 août s'est ouverte en quelques minutes seulement lors de l'éruption de la Soufrière en 1976.
The 30 August fault opened in just a few minutes during the 1976 Soufriere eruption.
© OVSG-IPGP

L'éruption de 1976 conduit l'observatoire à installer en 1985 deux fissuromètres sur deux des principales fractures du volcan (Fente du Nord et Faille du 30 août au Sud-Sud-Est). Ces instruments, constitués de deux pièces de métal scellées de part et d'autre de la faille, mesurent à l'aide d'un pied à coulisse les déplacements de cette dernière dans trois directions orthogonales, marquant ainsi le début des mesures des déformations du volcan. Toutefois, l'installation de fissuromètres n'est possible que sur un nombre limité de sites, aussi des extensomètres viennent compléter le réseau en 1995. Ces appareils, constitués de deux crochets scellés de chaque côté de la fracture, mesurent l'écartement de celle-ci. En dépit d'un nombre plus élevé de sites propices à leur déploiement, les extensomètres nécessitent de réaliser les mesures manuellement, manquent de précision (tout de même de l'ordre du dixième de millimètre) et ne mesurent les mouvements qu'en ouverture et fermeture de faille. Le réseau de fissuromètres et extensomètres compte aujourd'hui une quinzaine de sites répartis sur le dôme de la Soufrière.

L'avènement du géopositionnement par satellite, d'abord avec le système GPS puis étendu à d'autres constellations de satellites sous l'appellation GNSS (géolocalisation et navigation par un système de satellites), offre la capacité à l'observatoire en 2000 de mesurer les déformations à l'échelle de l'arc des petites Antilles, de manière automatique de surcroît. L'OVSG-IPGP gère actuellement 27 stations GNSS permanentes autonomes en énergie et télémetrées, dont 16 dédiées au volcan.

L'observatoire ne cesse d'étoffer ces réseaux de capteurs au fil des années. Entre 2008 et 2016, des sismomètres de marégraphes avec transmission satellite sont installés dans le cadre du dispositif d'alerte précoce aux tsunamis dans La Caraïbe. Les années suivantes voient le déploiement d'un ensemble de nouvelles stations de mesures, associées à l'émergence de techniques de surveillance novatrices : nouvelles techniques de mesures directes de gaz fumeroliens, mesures en continu de la température et de la composition chimique des panaches (MultiGAS), débitmètres au niveau des sources hydrothermales impactées par le volcan, etc. Ce développement du suivi de la géochimie des gaz de la Soufrière permet aujourd'hui de comprendre de plus en plus finement son système hydrothermal, sa structure profonde, ainsi que les facteurs internes et externes affectant son potentiel comportement éruptif.

The 1976 eruption led the observatory to install two fissurometers in 1985 on two of the volcano's main fractures (North Fault and August 30th Fault in the south-southeast). These instruments, consisting of two pieces of metal fixed on either side of the fault, measure the displacements of the fault in three orthogonal directions with a caliper, thus marking the beginning of measurements of the volcano's deformations. However, the installation of fissurometers was only possible on a limited number of sites, so extensometers were added to the network in 1995. These devices, consisting of two hooks fixed on each side of the fracture, measure the fracture's spacing. Despite being able to be deployed at a greater number of sites, extensometers require manual measurements, lack accuracy (still in the order of a tenth of a millimeter) and only measure movements during fault opening and closing. The network of fissurometers and extensometers now has about fifteen sites spread over the La Soufrière dome.

The advent of satellite geopositioning, first with the GPS system and then extended to other satellite constellations under the name GNSS (Global Navigation Satellite System), gave the observatory the ability in the year 2000 to measure deformations at the scale of the Lesser Antilles Arc, even automatically. The OVSG-IPGP currently manages 27 permanent, energy-independent, telemetered GNSS stations, 16 of which are dedicated to the volcano.

The observatory has been continuously expanding its sensor networks over the years. Between 2008 and 2016, tide gauge seismometers with satellite transmission were installed as part of the Caribbean tsunami early warning system. The following years saw the deployment of a series of new measuring stations, in connection to the emergence of innovative monitoring techniques: new techniques for direct measurements of fumarole gases, continuous measurements of the temperature and chemical composition of plumes (MultiGAS), flow meters at hydrothermal springs impacted by the volcano, etc. This development of gas geochemistry monitoring at La Soufrière now allows a more detailed understanding of its hydrothermal system, its deep structure, and the internal and external factors affecting its potential eruptive behavior.

40 ans de surveillance du Piton de la Fournaise par l'OVPF-IPGP : 1979-2019 40 years of monitoring Piton de la Fournaise by the OVPF-IPGP: 1979-2019

La nécessité de doter La Réunion d'un observatoire volcanologique apparaît suite à l'éruption « hors Enclos » d'avril 1977, qui détruit une partie du village de Piton Sainte Rose sur le littoral Est de l'île (une trentaine de cases détruites ainsi que la gendarmerie et l'église

La Réunion's need for a volcanological observatory appeared after the eruption "hors Enclos" (beyond the central caldera) in April 1977, which destroyed part of the village of Piton Sainte-Rose on the eastern coast of the island (about thirty huts destroyed as well as damage to





© OVPF-IPGP

endommagées). Il y a alors 177 ans que la lave n'était pas sortie de « l'Enclos Fouqué », cette caldera en forme de fer à cheval qui maintient naturellement la plupart des coulées dans cette zone totalement inhabitée. Cette éruption est l'occasion d'une prise de conscience collective sur la nécessité de surveiller ce volcan en dépit de son caractère principalement effusif. L'État, le département et le CNRS décident donc ensemble de la construction d'un observatoire volcanologique à Bourg Murat, à 15 km à vol d'oiseau du sommet du volcan et confient sa gestion à l'IPGP. C'est ainsi que l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF-IPGP) est mis en service en décembre 1979.

A cette mission principale de surveillance du volcan s'ajoutent trois autres activités : la recherche sur le fonctionnement et l'évolution des édifices volcaniques en général et du Piton de la Fournaise en particulier, la diffusion de connaissances auprès du grand public et, depuis début 2020, la surveillance opérationnelle de l'activité sismo-volcanique de Mayotte, avec l'appui du BRGM sur place.

De la même manière que l'OVSG-IPGP, l'OVPF-IPGP ne cesse de développer ses réseaux de capteurs depuis sa création. De trois capteurs permanents en 1980, il en maintient désormais 103 : sismomètres, GPS,

the gendarmerie and the church). It had been 177 years since lava had come out of the "Enclos Fouqué", the horseshoe-shaped caldera which naturally contains most of the flows in this totally uninhabited area. This eruption triggered a collective realization that it was necessary to monitor this volcano despite the mainly effusive nature of its eruptions. The State, the department and the CNRS therefore decided together to build a volcano observatory in Bourg Murat, 15 km as the crow flies from the volcano's summit, and entrusted its management to the IPGP. This is how the Volcanological Observatory of Piton de la Fournaise (OVPF-IPGP) came into operation in December 1979.

The OVPF-IPGP carries out three other types of activities in addition to its main mission of monitoring the volcano: research on the functioning and evolution of volcanic edifices in general and of Piton de la Fournaise in particular, dissemination of knowledge to the general public and, since the beginning of 2020, operational monitoring of seismic activity in Mayotte, with the support of the BRGM on site.

Like the OVSG-IPGP, the OVPF-IPGP has continued to expand its sensor networks since its inception. From three permanent sensors in 1980, it now maintains 103: seismometers, GPS, inclinometers, extensometers, soil

inclinomètres, extensomètres, stations de mesure de gaz dans le sol et l'atmosphère, stations météorologiques et caméras. Répartis sur 70 sites différents sur l'ensemble de l'île de La Réunion, ils transmettent leurs mesures en temps réel et permettent d'assurer un suivi 24 heures sur 24 et 365 jours par an de l'activité du Piton de la Fournaise. Il est ainsi le volcan le plus densément instrumenté au monde (les observatoires du Kilauea à Hawaii ou de l'Étna en Sicile disposent d'autant de capteurs mais sur des édifices beaucoup plus imposants). Ce réseau de surveillance a permis d'anticiper et de suivre 77 éruptions depuis sa création (1979-2019) et même de suivre une éruption en mode 100% confinée (2-6 avril 2020) lors de la crise sanitaire liée au COVID-19 (Peltier et al., 2020).

Le déploiement au fil des années de nouvelles stations de mesures, associé à l'émergence de nouvelles techniques de surveillance, permet d'avoir aujourd'hui une vision et une compréhension de plus en plus fine du système d'alimentation profond du Piton de la Fournaise et de son dynamisme, contribuant à une meilleure anticipation des éruptions.

Sa fréquence d'une éruption tous les huit mois en moyenne au cours des 40 dernières années, associée à un réseau instrumental dense, font du Piton de la Fournaise un vrai volcan laboratoire. C'est pourquoi les équipes de l'OVPF-IPGP accueillent des chercheurs du monde entier qui viennent régulièrement développer et tester de nouvelles techniques d'observation et y conduire de nouvelles études. De nombreuses collaborations ont ainsi été établies avec des organismes de recherche et de surveillance nationaux et internationaux (dont l'USGS et l'INGV, organismes américain et italien chargés de la surveillance volcanique). Depuis quelques années, un programme d'échanges scientifiques et techniques annuel lie l'observatoire au prestigieux HVO (Hawaiian Volcano Observatory).

Parallèlement à ces collaborations internationales, l'OVPF-IPGP travaille, au sein du SNOV (Service national d'observation en volcanologie), avec les services de l'OPGC (Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand). Les services OI2, HOTVOLC, et DynVOLC apportent des observations complémentaires à celles réalisées in-situ qui, intégrées aux données de l'OVPF-IPGP, permettent un meilleur suivi et une meilleure gestion de crise lors des phases éruptives du Piton de la Fournaise.

and atmospheric gas measuring stations, meteorological stations and cameras. Spread over 70 different sites throughout Reunion Island, they transmit their measurements in real time and make it possible to monitor the activity of Piton de la Fournaise 24 hours a day, 365 days a year. This makes it the most densely instrumented volcano in the world (the Kilauea observatory in Hawaii and the Etna observatory in Sicily have the same number of sensors but on much larger edifices). This monitoring network has made it possible to anticipate and monitor 77 eruptions since its creation (1979-2019) and even to monitor an eruption while in total lockdown (April 2-6, 2020) during the COVID-19 health crisis (Peltier et al., 2020).

The deployment over the years of new measuring stations, associated with the emergence of new monitoring techniques, now makes it possible to have an increasingly detailed vision and understanding of the deep feeding system of Piton de la Fournaise and its dynamics, contributing to better anticipation of eruptions.

Its frequency of one eruption every eight months on average over the last 40 years, combined with a dense instrument network, make Piton de la Fournaise a real laboratory volcano. This is why the OVPF-IPGP teams host researchers from all over the world who regularly come to develop and test new observation techniques and conduct new studies. Numerous collaborations have been established with national and international research and monitoring organizations (including the USGS and INGV, the American and Italian organizations in charge of volcanic monitoring). For several years, an annual scientific and technical exchange program has linked the observatory to the prestigious HVO (Hawaiian Volcano Observatory).

In parallel to these international collaborations, the OVPF-IPGP works, within the SNOV (National Volcanology Observation Service), with the services of the OPGC (Clermont-Ferrand Earth Physics Observatory). The OI2, HOTVOLC, and DynVOLC services bring complementary observations to those made in situ which, integrated with the OVPF-IPGP data, enable better monitoring and a better crisis management during the eruptive phases of Piton de la Fournaise.



Une surveillance volcanique bien rôdée Well-established volcanic monitoring

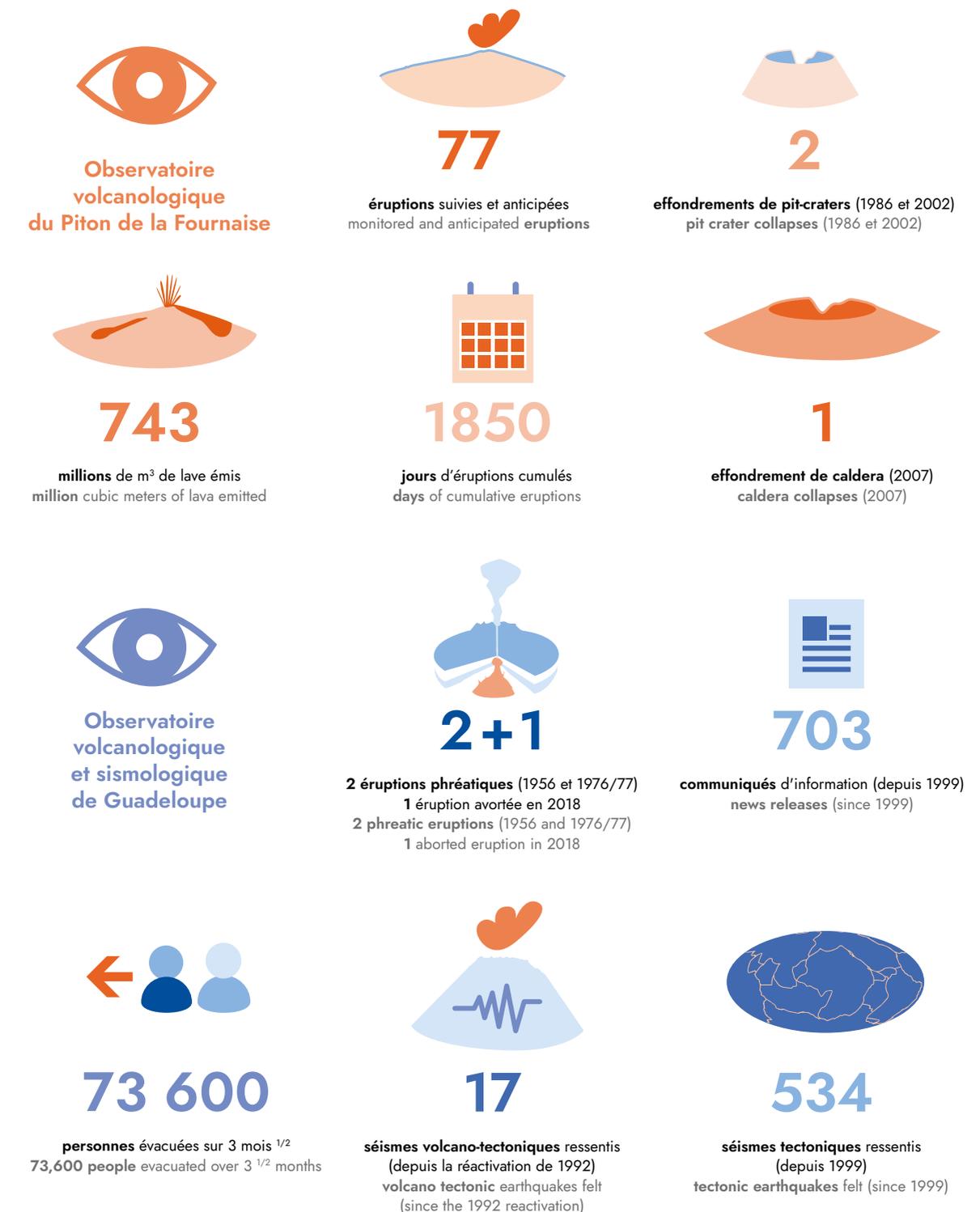
L'OVPF-IPGP et l'OVSG-IPGP sont aujourd'hui les premiers maillons des plans ORSEC spécifiques « Volcan Piton de la Fournaise » et « Volcan Soufrière ». En cas d'apparition de signes d'activité du Piton de la Fournaise à La Réunion ou de la Soufrière à la Guadeloupe, l'observatoire sur place informe la préfecture (via le cadre d'astreinte de l'état-major de zone et de protection civile de l'Océan Indien - EMZPCOI - pour La Réunion) et propose le déclenchement des niveaux d'alertes prévus par ce plan. La décision qui s'en suit est de la seule compétence du préfet qui s'appuie sur les conseils et analyses des observatoires de l'IPGP.

Pour mener à bien cette mission de surveillance, l'OVPF-IPGP et l'OVSG-IPGP ont mis en place une veille opérationnelle 24h/24 composée de personnels d'astreinte se relayant de manière hebdomadaire. Ces derniers sont alertés à la fois par un système automatique de détection de changement d'activité du volcan et par des contrôles effectués périodiquement. Autrefois effectuée sur site, cette surveillance en continue est désormais possible à distance depuis le domicile. Pendant les phases éruptives du Piton de la Fournaise, des astreintes renforcées sont instaurées (roulement toutes les 6 à 12 heures) avec un appui à distance de membres de l'IPGP et de l'OPGC (Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand).

Today, the OVPF-IPGP and the OVSG-IPGP are the first line in the specific "Volcan Piton de la Fournaise" and "Volcan Soufrière" ORSEC emergency plans. In the event of any signs of activity of Piton de la Fournaise in La Réunion or of La Soufrière in Guadeloupe, the observatory on site informs the prefecture (via the on-call staff of the zone and civil protection headquarters of the Indian Ocean - EMZPCOI - for La Réunion) and proposes triggering the alert levels provided for by this plan. The decision that follows is the exclusive responsibility of the Prefect, who relies on the advice and analysis of the IPGP observatories.

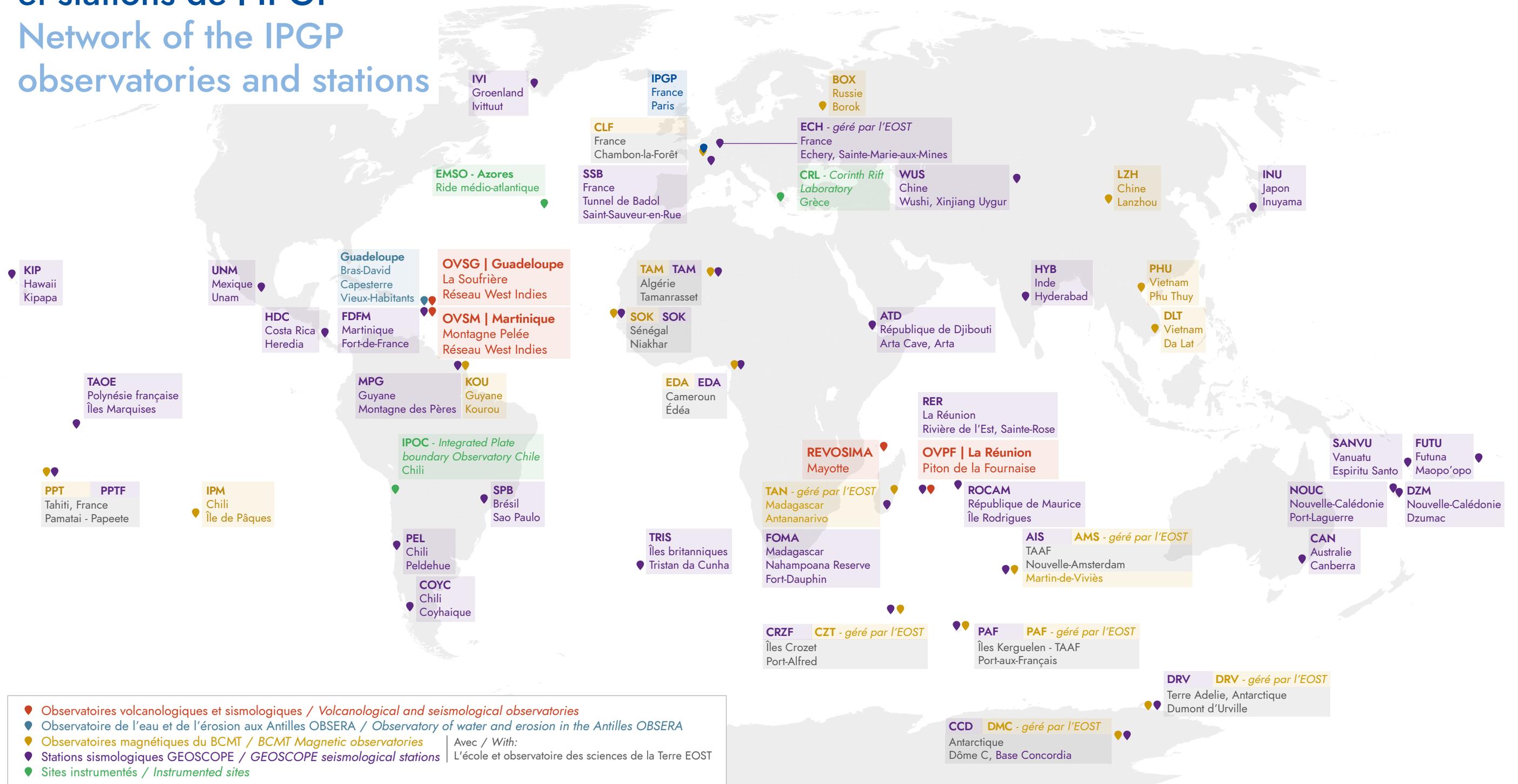
To carry out this monitoring mission, the OVPF-IPGP and the OVSG-IPGP have set up a 24-hour operational watch composed of on-call staff who rotate on a weekly basis. They are alerted both by an automatic system for detecting changes in the volcano's activity and by periodic checks. Previously carried out on site, this continuous monitoring is now possible from home. During the eruptive phases of Piton de la Fournaise, reinforced on-call duty is set up (rotation every 6 to 12 hours) with remote support from members of the IPGP and the OPGC (Clermont-Ferrand Earth Physics Observatory).

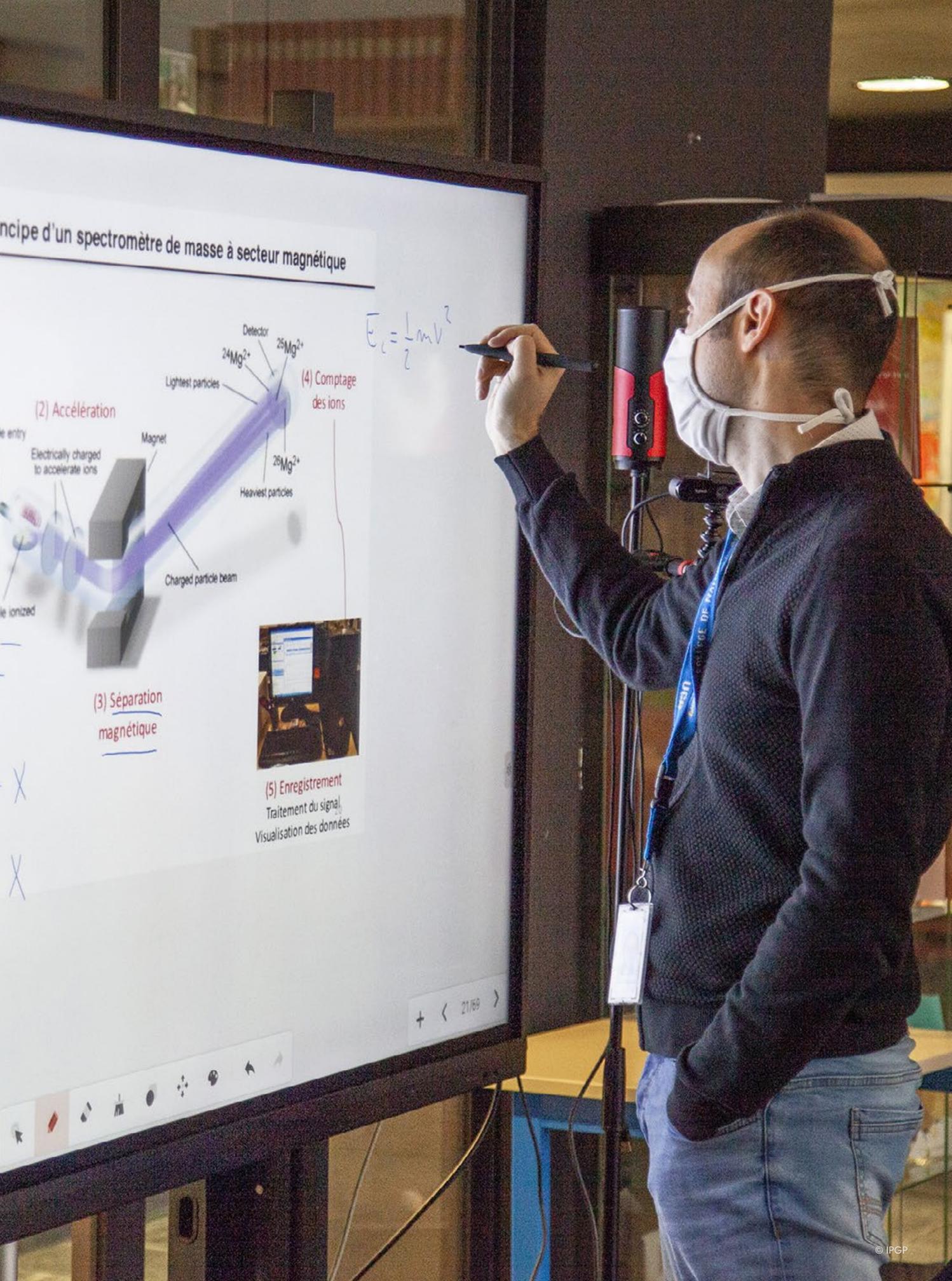
Chiffres clés Key figures



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

L'enseignement à l'épreuve de la pandémie Pandemic-proofing education

Suite à la mise en œuvre soudaine du premier confinement le 16 mars 2020 en France, les enseignants et étudiants de l'IPGP-Université de Paris ont dû s'adapter rapidement et faire preuve d'inventivité. L'utilisation d'outils numériques tels que la messagerie instantanée Discord et les plateformes d'hébergement de vidéos Youtube, Panopto et Moodle a ainsi permis la tenue des cours et des examens à distance. Les répercussions se sont cependant révélées beaucoup plus importantes sur les stages, notamment ceux de master qui n'ont pu être effectués que de façon très dégradée, impactant de fait la qualité de la formation des étudiants de second cycle.

Dans la perspective d'un second confinement, le département de la formation et des études doctorales (DFED) a décidé de s'équiper au cours de la période printemps-été. Caméras, micros, tablettes graphiques ou encore écrans numériques interactifs ont ainsi été achetés pour que les enseignants puissent enseigner en toutes circonstances : sur site, à distance ou de manière hybride. Par ailleurs, des clés 4G et des ordinateurs portables ont été distribués aux étudiants qui en faisaient la demande.

Afin d'assurer le retour des étudiants de L1 et la mise en place des TP dans les meilleures conditions de sécurité possibles, l'institut s'est équipé en fin d'année de purificateurs d'air et de masques FFP2. En complément de ces mesures, la réalisation systématique de tests PCR en 2021 devrait permettre d'organiser les stages de terrain.

Following the sudden first lockdown in France on March 16, 2020, the professors and students of the IPGP-Université de Paris had to adapt quickly and inventively. The use of digital tools such as the Discord instant messaging system and the video hosting platforms YouTube, Panopto and Moodle made it possible to hold classes and exams remotely. However, the repercussions were much more significant for internships, especially those at the master's level, which could only continue in a very scaled-back manner, thus impacting the quality of the training of graduate students.

In anticipation of a second lockdown, the Department of Education and Doctoral Studies (DFED) decided to acquire the necessary equipment during the spring-summer period. Cameras, microphones, graphics tablets and interactive digital screens were purchased so that professors could teach in all circumstances: on site, remotely or in a hybrid manner. In addition, 4G USB modems and laptops were distributed to students who requested them.

In order to ensure the return of the L1 (first-year undergraduate) students and the running of practical courses in the safest conditions possible, at the end of the year the institute equipped itself with air purifiers and FFP2 masks. In addition to these measures, the routine performance of PCR tests in 2021 should make it possible to organize field courses.

Bien que ces deux confinements se soient avérés très éprouvants psychologiquement pour les étudiants et les personnels, les équipes pédagogiques et les responsables de parcours de formation se sont investis pleinement pour maintenir le lien avec les étudiants en difficulté.

Although these two lockdowns proved to be very trying psychologically for students, students and staff, the teaching teams and the heads of the educational programs were fully engaged in maintaining a connection with struggling students.

Les formations professionnalisantes de l'IPGP The IPGP's professional training courses

L'institut compte aujourd'hui quatre formations à destination du monde professionnel, deux en licence et deux en master. Toutes ces formations sont ouvertes à l'alternance sous la forme de contrats d'apprentissage ou de contrats de professionnalisation, permettant aux étudiants d'exercer à mi-temps au sein d'une entreprise de leur domaine d'étude. D'année en année, le succès grandissant de ces formations renforce l'image de l'IPGP auprès de ses partenaires industriels.

Licences

> Gestion et traitement des déchets (GTD) : 12 élèves en 2019-2020

La licence professionnelle « Qualité Hygiène Santé Sécurité Environnement », parcours « Gestion et Traitement des Déchets », a été créée en 2012 en associant différents industriels pour répondre aux besoins du secteur, en pleine mutation technologique, de recruter des employés techniciens agents de maîtrise. Cette formation enseigne ainsi la culture technique des matières et outils industriels, les aspects normatifs (iso 9000/14000/50000), le management des équipes, le droit de l'environnement (ICPE, délégation de service public) et l'utilisation des outils numériques. Du fait de ce large éventail de compétences, une insertion professionnelle au sein de collectivités territoriales et de bureaux d'études est également envisageable. Sur les 600 heures d'enseignement par an, près de la moitié est assurée par des enseignants chercheurs, près de 39% par des professionnels du secteur et le reste par les professeurs associés de la DFED. Cette formation professionnelle offre ainsi l'opportunité d'un financement externe important à travers les contrats d'apprentissage, de professionnalisation et la formation continue (y compris la VAE - validation des acquis d'expérience), mais nécessite une gestion rigoureuse et chronophage (relations extérieures entre les centres de formation, les entreprises et les intervenants pédagogiques professionnels, suivi des présences, justification des évaluations, évaluation des enseignements, conseil pédagogique).

The institute currently has four courses focused towards the professional sector, two at the bachelor's level and two at the master's level. All these courses are open to work-study arrangements in the form of apprenticeship or professionalization contracts (the two types of contract in the French dual education/work-study system), allowing students to study while working part-time at a company in their field of study. Year after year, the growing success of these courses strengthens the IPGP's image with its industrial partners.

Undergraduate programs

> Waste Management and Treatment (GTD): 12 students in 2019-2020

The "Waste Management and Treatment" track of the "Quality Health Safety Environment" technical degree was created in 2012 in association with various industrial partners to meet the needs of the sector, which is undergoing major technological changes, in recruiting technicians and supervisors. This course teaches the technical culture of materials and industrial tools, the aspects related to the relevant standards (ISO 9000/14000/50000), team management, environmental law (facilities requiring environmental impact assessment - ICPE, public service delegation) and the use of digital tools. Because of this wide range of skills, employment within local authorities and design offices is also possible. Of the 600 teaching hours per year, nearly half are provided by professors, nearly 39% by professionals in the sector and the remainder by the DFED's associate professors. This professional training course offers an opportunity for significant external financing through apprenticeship contracts, professionalization contracts and continuing education (including VAE - validation of acquired experience, granting qualifications on the basis of professional experience), but requires rigorous and time-consuming management (external relations between training centers, companies and professional teaching staff, monitoring of attendance, justification of assessments, evaluation of teaching, education council).



Campus des Grands Moulins d'Université de Paris
Grands Moulins Campus of Université de Paris
© IPGP

> Méthode d'exploration en géophysique appliquée (MEGA) : 3 élèves en 2019-2020

Ce parcours proposé en alternance a pour objectif de former les futurs techniciens et techniciens supérieurs aux méthodes quantitatives de la géophysique, de prospection, d'imageries géophysiques (sismique, électrique, électromagnétique, gravimétrique, magnétique, radar), ainsi qu'à l'acquisition de données et leur traitement en les appliquant aux différents domaines des géosciences : ressources naturelles, environnement naturel et urbain, génie civil, auscultation du sol, du sous-sol, des ouvrages. Cette formation vise une intégration professionnelle rapide, suite à l'acquisition d'une première expérience professionnelle, aussi bien dans de grandes entreprises que des PME et PMI.

> Applied Geophysical Exploration Method (MEGA): 3 students in 2019-2020

The aim of this course, which is offered on a work-study basis, is to train future technicians and senior technicians in quantitative methods of geophysics, prospecting, geophysical imaging (seismic, electrical, electromagnetic, gravimetric, magnetic, radar), as well as in data acquisition and processing, by applying them to the various fields of geosciences: natural resources, natural and urban environments, civil engineering, and monitoring of soil, subsoil and structures. This training is aimed at enabling graduates to rapidly join the workforce following a first professional experience, in large companies or SMEs.



Masters

> Génie de l'environnement et industries (GEI) : 33 élèves en 2019-2020

Les diplômés de ce parcours sont formés aux techniques environnementales de diagnostic de qualité des milieux et de traitement des nuisances. Ils sont ainsi en mesure d'intégrer toutes sortes d'entreprises industrielles, de bureaux d'études, de sociétés de service, d'aménageurs publics ou privés, de gestionnaires de site ou encore de collectivités territoriales dans des domaines variés : analyse et contrôle des pollutions dans les milieux, étude et conception de procédés et de procédures propres, efficacité énergétique, gestion et traitement des pollutions et des déchets et leurs valorisations, développement durable et économie circulaire, application des normes environnementales et énergétiques. Ce parcours s'effectue en apprentissage et en alternance sur les deux années de master.

> Géophysique appliquée (GPA) : 10 élèves en 2019-2020

Ce parcours a pour objectif de former les professionnels de demain de la prospection géophysique, du génie civil et de la gestion de l'environnement. Il forme aux méthodes quantitatives de la géophysique, de prospection, d'imagerie géophysique (sismique, électrique, électromagnétique, gravimétrique, magnétique, radar), à l'acquisition de données et leur traitement mathématique, ainsi qu'à la modélisation des processus physiques et chimiques en les appliquant à la connaissance du sol et du sous-sol. Proposé en alternance, ce cursus permet de tisser des liens forts avec les milieux professionnels du domaine (stages, emplois, R&D) et assure des débouchés variés au niveau cadre, aussi bien dans de grandes entreprises internationales de géophysique de prospection que dans des bureaux d'études ou des petites entreprises de géophysique appliquée spécialisées dans le domaine de la géotechnique ou du génie civil.

Master's programs

> Environmental Engineering and Industry (GEI): 33 students in 2019-2020

Graduates of this course are trained in environmental techniques for diagnosing the quality of environments and managing factors that have a negative impact. They are thus able to work in all kinds of industrial companies, research or consultancy firms, service companies, public or private developers, site managers and local authorities in a variety of fields: analysis and control of pollution in the environment, study and design of clean processes and procedures, energy efficiency, management and treatment of pollution and waste and their recovery, sustainable development and circular economy, and application of environmental and energy standards. This course is carried out as an apprenticeship and work-study over the two years of the master's degree.

> Applied Geophysics (GPA): 10 students in 2019-2020

This course aims to train tomorrow's professionals in geophysical prospecting, civil engineering and environmental management. It provides training in quantitative geophysical methods, prospecting, geophysical imaging (seismic, electrical, electromagnetic, gravimetric, magnetic, radar), data acquisition and mathematical processing, as well as the modelling of physical and chemical processes by applying them to knowledge of the soil and subsoil. Offered as a work-study program, this course allows students to develop strong ties with the professional sector in their field (internships, jobs, R&D) and ensures a variety of career opportunities at the management level in large international geophysical prospecting companies, research or consultancy firms, and small applied geophysics companies specializing in geotechnics or civil engineering.



Études doctorales Doctoral studies

L'IPGP compte 82 doctorants répartis au sein de l'ensemble des équipes de recherche et des observatoires, y compris ceux d'outre-mer. Ils constituent la force vive de l'institut tant au niveau des activités de recherche (30% des présentations en congrès internationaux) que de la vie associative (association étudiante HEKLA, initiative écologique Green Globe...). Tous les doctorants de l'IPGP disposent d'un contrat de travail de trois ans au cours duquel ils réalisent un travail de recherche original et ambitieux, le plus souvent à la faveur de collaborations internationales. En complément du manuscrit de thèse et de la soutenance publique marquant l'aboutissement du doctorat, les résultats obtenus sont systématiquement mis en valeur dans des publications scientifiques, permettant aux nouveaux docteurs de gagner en reconnaissance et crédibilité auprès de leurs pairs et d'étendre leur réseau professionnel.

Les doctorants de l'IPGP sont maintenant tous inscrits à l'école doctorale STEP'UP (ED 560) et à Université de Paris (UP). Ils profitent ainsi d'un large choix de formations scientifiques et méthodologiques et de la possibilité

The IPGP has 82 PhD candidates spread across all the research teams and observatories, including those overseas. They are the lifeblood of the institute both in terms of research activities (30% of presentations in international meetings) and in terms of associative life (student association HEKLA, Green Globe environmental initiative, etc.). All the IPGP PhD candidates have a three-year employment contract during which they carry out original and ambitious research work, most often through international collaborations. In addition to the thesis manuscript and the public defence marking the end of the PhD, the results obtained are systematically highlighted in scientific publications, enabling new doctors to gain recognition and credibility with their peers and to expand their professional network.

The IPGP PhD candidates are now all registered at the STEP'UP (Doctoral School 560) PhD program and Université de Paris (UP). They thus benefit from a wide range of scientific and methodological courses and the possibility of training through research in many disciplines. By developing their operational and adaptive



de se former par la recherche dans de nombreux champs disciplinaires. En développant leurs compétences opérationnelles et adaptatives, ces formations de qualité conduisent à valoriser le doctorat auprès des professionnels privés et publics.

L'ED STEP'UP gère le bon déroulement administratif et scientifique de la thèse et met à la disposition des doctorants un ensemble d'interlocuteurs compétents à même de solutionner leurs éventuels problèmes. Des entretiens individuels sont organisés annuellement avec les membres de l'ED ainsi que des réunions du comité individuel de suivi de thèse, qui évalue régulièrement avec la direction de thèse et le doctorant les conditions de sa formation et les avancées de sa recherche.

Un service des études doctorales dédié

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'ED STEP'UP et le Collège des études doctorales et HDR (CED) d'Université de Paris. Le SED fait partie du nouveau Département de la formation et des études doctorales (DFED) de l'IPGP qui permet à tous les acteurs de licence, master et doctorat d'interagir sur les différents parcours universitaires. Unique dans le paysage universitaire, cette structure peut s'appuyer sur les activités de recherche de l'institut pour fournir un cadre cohérent pour l'ensemble des missions de formation de l'IPGP autour des sciences de la Terre et de l'environnement. Son principal objectif reste d'offrir des conditions de travail et des perspectives de carrière les meilleures possibles pour tous les doctorants.

skills, this training program led to a better appreciation of the graduated student among private and public professionals. The STEP'UP Doctoral School manages the smooth administrative and scientific progress of the thesis and provides PhD candidates with a set of efficient staffs able to solve any problems they may have. Individual interviews are organised annually with the members of the Doctoral School as well as meetings of the individual PhD mentoring committee, which regularly assesses with the PhD advisor and the PhD candidate the conditions of his or her training and the progress of his or her research.

A dedicated doctoral studies service

The Doctoral Studies Department (SED) of the IPGP leads and coordinates all PhD activities within the IPGP and the UMR 7154, in close liaison with STEP'UP and the "Collège des études doctorales et HDR" (CED) of Université de Paris. The SED is part of the new Department of Training and Doctoral Studies (DFED) of the IPGP, which allows all Bachelor's, Master's and PhD program's actors to interact on different academic courses. Unique in the university landscape, this structure can lean on the Institute's research activities to provide a coherent framework for all of the IPGP's training missions related to Earth and Environmental Sciences. Its main objective remains to offer the best possible working conditions and career prospects for all PhD candidates.

Chiffres clés Key figures



thèses soutenues en 2020 aux financements très divers :

- 10** du MESRI - *Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation*
- 3** de l'IdEx Université de Paris
- 2** de l'ERC - *Conseil européen de la recherche*
- 3** autres

PhDs defended in 2020 with a wide range of funding:

- 10** contracts from MESRI - *Ministry of Higher Education, Research and Innovation*
- 3** IdeX Université de Paris
- 2** of the ERC - *European Research Council*
- 3** others



8 femmes
10 hommes

parité femmes-hommes
gender equality



nouvelles thèses commencées en 2020 dont :

- 13** doctorants étrangers et **12** français
- 12** doctorants issus de masters IPGP et **13** hors formation IPGP
- 11** femmes et **14** hommes

new PhDs started in 2020 including:

- 13** foreign PhD candidates and **12** French
- 12** PhD candidates from IPGP masters courses and **13** outside IPGP training
- 11** women and **14** men

Focus



Alice Jacob Étude des sources sismiques détectées par InSight sur Mars et de son environnement géologique Study of the seismic sources detected by InSight on Mars and its geological environment

La mission InSight de la NASA s'est posée à la surface de la planète Mars en novembre 2018. C'est la première fois qu'un sismomètre fonctionnel réussit à sonder l'intérieur de la planète rouge en enregistrant son activité sismique, suite aux défaillances des missions Viking et Mars 96.

Depuis l'atterrissage d'InSight, plus de 500 événements sismiques ont pu être détectés par son sismomètre SEIS. Dans le cadre de ma thèse, je m'intéresse à étudier les sources qui génèrent ces séismes martiens (ou « marsquakes »). Celles-ci peuvent être d'origine volcanique ou tectonique, par le biais des grands volcans et failles martiennes, météorologique à travers les puissantes tornades de poussières « dust devils » ou encore météoritique via l'impact au sol de petits corps.

Forts de notre expérience sismologique terrestre du siècle dernier, caractériser ces sources nous aide à déduire de précieuses informations sur la distance à l'épicentre, les

The NASA's InSight mission landed on Mars in November 2018. This is the first time a functioning seismometer has successfully probed the interior of the Red Planet by recording its seismic activity, following the failures of the Viking and Mars 96 missions.

Since InSight's landing, more than 500 seismic events have been recorded by its seismometer SEIS. In my PhD, I am interested in studying the sources that generate these Martian quakes (or marsquakes). These may be of tectonic or volcanic origins, due to the large Martian volcanoes and faults, meteorological origin with the powerful "dust devil" storms, or meteoritic origin with the impact of small bodies on the ground.

Based on our seismological experience of the last century on Earth, constraining these sources helps us to deduce valuable information on the epicentral distance, the terrain and their rocks where the seismic waves

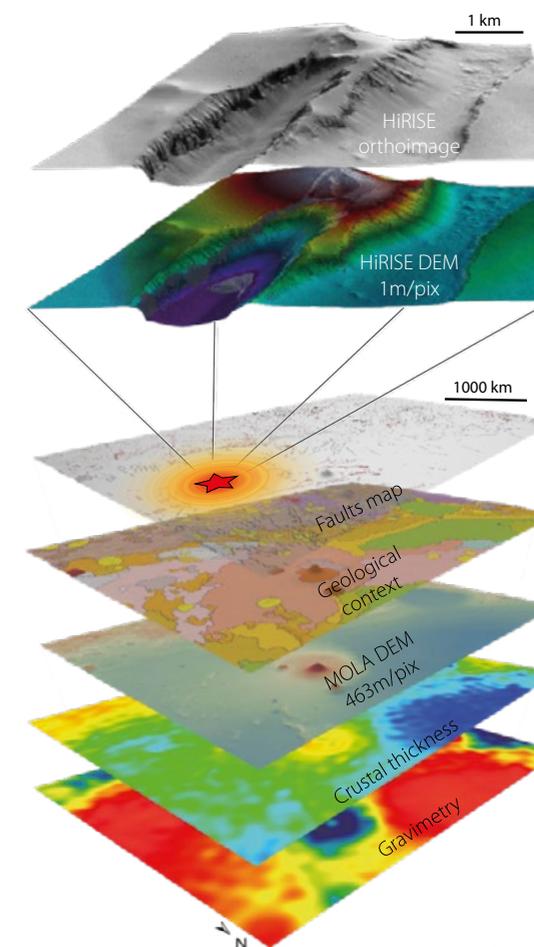
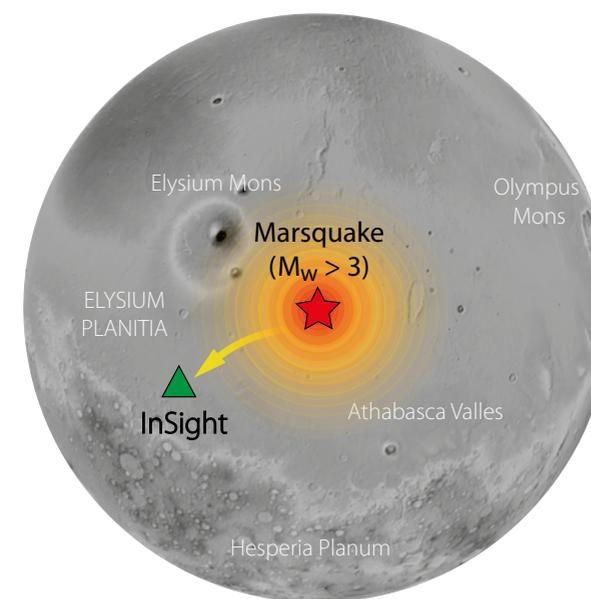
propagat. By extension, it allows us to calculate the seismic velocities at depth.

terrains traversés et les roches qui les composent et par extension nous permet de calculer les vitesses sismiques en profondeur.

A ce titre, les données satellitaires s'avèrent essentielles pour préciser la nature de la source sismique et remonter ainsi aux différents paramètres sismologiques qui permettront à leur tour de dévoiler l'intérieur de Mars et ses discontinuités sismiques. Ce travail est rendu possible grâce aux nombreux orbiteurs positionnés autour de Mars, tels que le Mars Reconnaissance Orbiter MRO (NASA), Mars Express (ESA) ou le Mars Global Surveyor MGS (NASA). Mon rôle se focalise sur l'analyse des bases de données satellitaires de gravimétrie (altimètre MOLA, MGS), d'imagerie (caméras CTX et HiRISE, MRO) et de géologie (caméra HRSC, Mars Express), couplée au traitement des signaux des marsquakes enregistrés par InSight.

propagate. By extension, it allows us to calculate the seismic velocities at depth.

For this purpose, satellite data are essential to specify the nature of the seismic sources, and thus to qualify the various seismological parameters which will reveal the interior of Mars and its seismic discontinuities. This is made possible thanks to the numerous orbiters around Mars, such as the Mars Reconnaissance Orbiter MRO (NASA), Mars Express (ESA) or the Mars Global Surveyor MGS (NASA). My work focuses on the analysis of satellite databases of gravimetry (MOLA altimeter, MGS), imagery (CTX and HiRISE cameras, MRO) and geology (HRSC camera, Mars Express), coupled with the signal processing of the InSight marsquakes.



Traitement des données sismiques d'un marsquake enregistré par InSight. InSight detection and recording of a marsquake: seismic data processing. © NASA MRO HiRISE, NASA MGS MOLA, Knapmeyer et al.(2006), USGS (2014)

Analyses des données satellitaires pour contraindre la source sismique. Analysis of orbiters data: constraints on the seismic source. © NASA MRO HiRISE, NASA MGS MOLA, Knapmeyer et al.(2006), USGS (2014)



Contacts :

Doctorante / PhD candidate : Alice Jacob - ajacob@ipgp.fr

Directeurs de thèse / PhD supervisors : Philippe Lognonné - lognonne@ipgp.fr ;

Antoine Lucas - lucas@ipgp.fr



Mickaël Tharaud Vers une meilleure détection et caractérisation des nanoparticules dans l'environnement

Towards a better detection and characterization of nanoparticles in the environment

De manière directe ou indirecte, l'être humain contribue aujourd'hui à l'érosion des sols à travers ses activités agricoles ou à la perturbation de la faune et de la flore par ses émissions de contaminants. Les nanoparticules (NPs) anthropiques, objets de taille nanométrique (< 100 nm) particulièrement réactifs, qu'ils soient produits en masse pour leurs propriétés physico-chimiques intéressantes ou créés de manière accidentelle, représentent une nouvelle famille de ces contaminants dit émergents. Suivre et comprendre leur évolution dans l'environnement, déterminer leur provenance ou encore les distinguer des NPs naturelles sont donc des enjeux majeurs pour la zone critique à l'Anthropocène. Pour ce faire, ces objets doivent être détectés et caractérisés de manière fiable, que ce soit au sein de milieux naturels, d'espèces vivantes voire au cours de leur fabrication, afin de favoriser une production de NPs plus éco-compatible. En dépit de l'existence d'un nombre relativement important de techniques analytiques, celles-ci présentent des points faibles liés à leur difficulté de mise en œuvre ou leur manque de sensibilité.

Cette thèse vise à lever ces verrous analytiques et géochimiques par la mise en œuvre séquentielle

Today, humans directly or indirectly contribute to soil erosion through their agricultural activities or to the disturbance of flora and fauna through emissions of pollutants. Anthropogenic nanoparticles (NPs), objects of nanometric size (< 100 nm) that are particularly reactive, whether produced in mass for their interesting physicochemical properties or accidentally generated, represent a new family of these so-called emerging pollutants. Monitoring and understanding their evolution in the environment as well as determining their origin or even distinguishing them from natural NPs are therefore major issues for the critical zone during the Anthropocene. To do so, these objects must be detected and characterized reliably, whether in natural environments, living species or even during their production, in order to incite more eco-compatible NP production. Despite the existence of a relatively large number of analytical techniques, these present weaknesses linked to their difficulty of implementation or their lack of sensitivity.

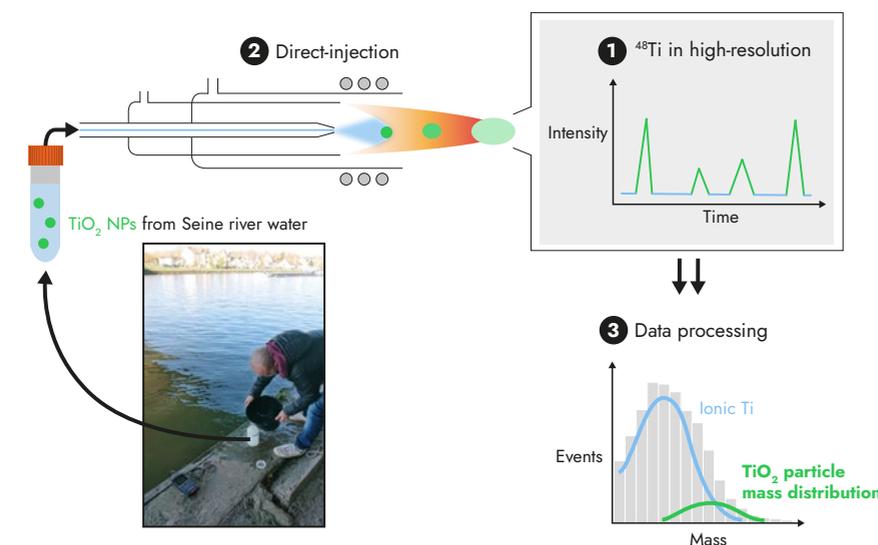
This PhD aims to eliminate these analytical and geochemical obstacles through the sequential and combined implementation of innovative tools and methods:

et combinée d'outils et de méthodes novatrices :
 ① le comptage de particules par spectrométrie de masse à source plasma en mode particule unique (spICP-MS), à l'aide d'un spectromètre de masse haute résolution améliorant les limites de détection ; ② couplé au développement d'une technique originale d'injection directe des NPs dans le plasma, permettant d'optimiser le rendement de nébulisation ; ③ fiabilisé par une nouvelle approche pour le traitement des signaux, facilitant la distinction entre le signal de l'élément constitutif d'une NP sous forme dissoute et celui du même élément sous forme nanoparticulaire.

Cette nouvelle méthodologie est renforcée dans une seconde étape par l'acquisition du signal à l'aide d'un spectromètre de masse à temps de vol. Celui-ci permet une analyse multi-élémentaire à haute fréquence qui favorise la discrimination entre les NPs d'origine naturelle et celles d'origine anthropique dans des échantillons géologiques et biologiques (eaux de rivières, fluides biologiques ou mollusques).

① particle counting by single particle inductively coupled plasma mass spectrometry (spICP-MS), using a high resolution mass spectrometer to improve detection limits; ② coupled with the development of an original technique for the direct injection of NPs into the plasma, enhancing the nebulization efficiency; ③ made more reliable by a new approach for the signal processing, facilitating the distinction between the signal of the constituent element of a NP in dissolved form and that of the same element in nanoparticulate form.

This new methodology is strengthened in a second step by the acquisition of the signal using a time-of-flight mass spectrometer. This allows a high frequency multi-elemental analysis which facilitates the discrimination between natural and anthropogenic NPs in geological and biological samples (river water, biological fluids or molluscs).



Contacts :

Doctorant / PhD candidate : Mickaël Tharaud - tharaud@ipgp.fr

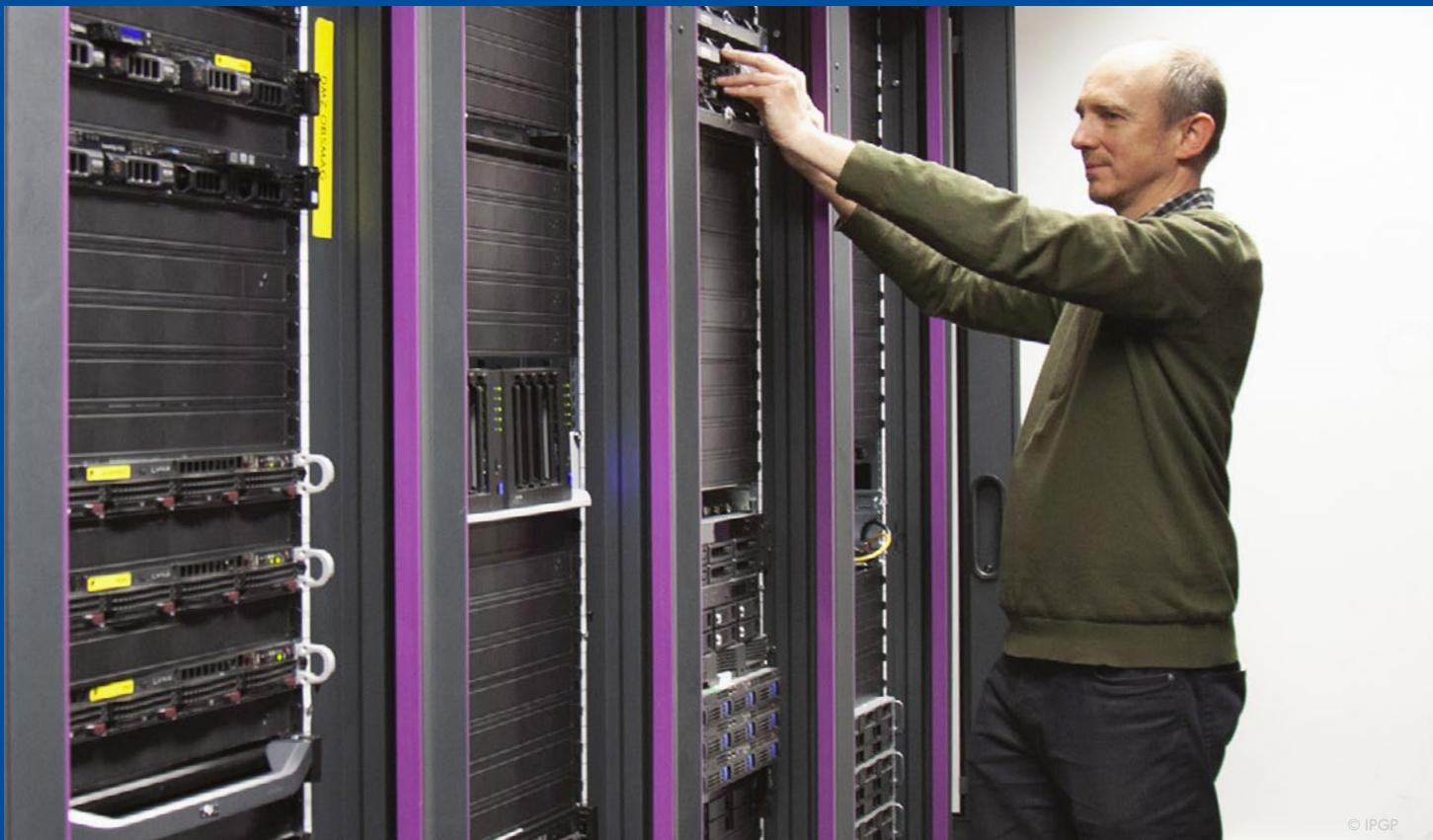
Directeur de thèse / PhD supervisor : Marc Benedetti - benedetti@ipgp.fr

Un ingénieur doctorant ?

Depuis plus de 10 ans, mes activités d'ingénieur d'études en techniques d'analyses chimiques, au sein de l'IPGP - Université de Paris consistent notamment à proposer les meilleures techniques d'analyses nécessaires aux projets des chercheurs tout en assurant un suivi après analyse fiable, mais aussi à maintenir le parc analytique dans des conditions optimales afin d'obtenir des données de qualité.

A PhD candidate engineer ?

For more than 10 years, my activities as a research engineer in chemical analysis techniques at the IPGP - Université de Paris have consisted in proposing the best analysis techniques necessary for researchers' projects while ensuring reliable post-analysis follow-up, but also in maintaining the analytical equipment in optimal conditions in order to obtain quality data.



Olivier Rozier

Étude numérique des dunes linéaires

Numerical study of linear dunes

L'étude des dunes de sable est devenue au fil des années un champ de recherche actif à la croisée de plusieurs sciences : géologie, physique des milieux granulaires, dynamique des fluides, climatologie, systèmes complexes. Chacune d'entre elles contribue à enrichir notre compréhension des populations de dunes observées sur Terre mais aussi sur d'autres corps planétaires tels que Mars et Titan.

L'objectif de cette thèse est de décrire la morphogenèse des dunes qui s'allongent sous l'action d'un régime de vent bidirectionnel. Classées dans la catégorie des dunes « linéaires », celles-ci s'étendent souvent sur de vastes territoires. Les modalités de leur apparition et de leur développement font encore l'objet de nombreux questionnements.

L'approche que nous avons adoptée s'appuie sur des simulations numériques lancées sur de puissants calculateurs. La principale difficulté est de modéliser à la fois le transport du sable, l'écoulement du vent et le couplage entre ces deux milieux qui obéissent à des lois physiques distinctes. La solution choisie est basée sur une

The study of sand dunes has become over the years an active field of research at the crossroads of several sciences : geology, granular matter physics, fluid dynamics, climatology, complex systems. They all contribute to enhance our understanding of the dune fields observed on Earth but also on other planetary bodies such as Mars and Titan.

The objective of this thesis is to describe the morphogenesis of dunes that elongate under the action of a bidirectional wind regime. Classified as "linear" dunes, they often extend over vast territories. The conditions of their appearance and development are still being debated.

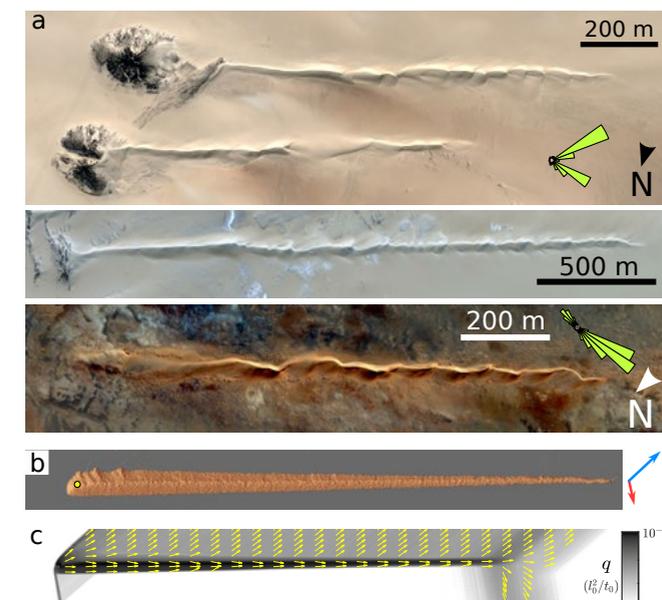
The approach we have adopted is based on numerical simulations run on powerful computers. The main difficulty is to model at the same time the sand transport, the wind flow and the coupling between these two media, which obey distinct physical laws. The selected solution is based on a particular family of algorithms called "cellular automata", where space is discretized into small volumes arranged in a regular manner and governed by simple evolutionary rules.

famille d'algorithmes particulière, appelée « automates cellulaires », où l'espace est discrétisé en petits volumes agencés de manière régulière et régis par des règles d'évolution relativement simples.

Nos simulations numériques ont ainsi permis de reproduire des motifs dunaires similaires à ceux observés dans la nature et de démontrer l'existence d'un état stationnaire. Grâce à ces résultats, nous avons pu décrire précisément la dynamique d'élongation des dunes et leur morphologie dans des conditions de vent variées. Enfin, l'identification des mécanismes physiques sous-jacents ouvre la voie à une meilleure classification des différents types de dunes.

Our numerical simulations made it possible to reproduce dune patterns similar to those observed in nature and to demonstrate the existence of a stationary state. Thanks to these results, we have been able to describe precisely the elongation dynamics of the dunes and their morphology under various wind conditions. Finally, the identification of the underlying physical mechanisms opens the way to a better classification of the different types of dunes.

Légende image ci-dessous / image caption below
a Dunes linéaires et rose des flux au Niger (haut-milieu) et en Mauritanie (bas). **b** Forme stationnaire de la dune et vecteurs de transport dans le modèle numérique. **c** Intensité et direction du flux moyen de sable.
 a Linear dunes and sand flux roses in Niger (top-middle) and Mauritania (bottom). **b** Steady-state dune shape and transport vectors in the numerical model. **c** Intensity and direction of the average sand flux.
 © IPGP



Contacts :

Doctorant / PhD candidate : Olivier Rozier - rozier@ipgp.fr
 Directeurs de thèse / PhD supervisors : Clément Narteau - narteau@ipgp.fr ;
 Sylvain Courrech du Pont - sylvain.courrech@u-paris.fr

Un ingénieur doctorant ?

En tant qu'ingénieur de recherche diplômé en informatique, je contribue aux travaux scientifiques de l'institut, avec l'appui du service informatique et du service de calcul parallèle. Mes qualifications et mon expérience en développement d'applications et en optimisation sont ainsi mises au service des différents projets de recherche, en lien avec les chercheurs et leurs équipes, qu'ils travaillent à Université de Paris, à l'Université de Shaanxi en Chine ou à la NASA.

A PhD candidate engineer ?

As a research engineer graduated in computer science, I contribute to the scientific work of the institute with the support of the IT department and the parallel computing platform. Thus I bring my qualifications and my experience in software development and optimization to various research projects, in connection with the researchers and their teams, whether they work at Université de Paris, at Shaanxi Normal University (China) or at NASA.



Relations internationales International relationships

L'année 2020 a été marquée par l'acceptation de Circle U par la Commission européenne ainsi que le projet associé ERIA (Empowering Research and Innovation Actions within Circle U) dans le cadre du programme SWAFS (Science With and For Society). Circle U est un modèle d'université européenne inclusive, à forte intensité de recherche et interdisciplinaire. Il s'agit d'un consortium de sept universités européennes : Université d'Oslo (Norvège), Paris (France), Aarhus (Danemark), Belgrade (Serbie), Humboldt de Berlin (Allemagne), King's College de Londres (Royaume-Uni) et Université catholique de Louvain (Belgique). L'IPGP joue un rôle clé au sein de Circle U puisque Jérôme Gaillardet est le représentant d'Université de Paris pour un Work Package « Enseignement et recherche en lien avec la société ».

Malgré la crise sanitaire, plusieurs outils ont été maintenus :

Les bourses MIEM :

Pour attirer les meilleurs étudiants de master et de doctorat, des bourses annuelles (MIEM) sont distribuées aux étudiants étrangers qui ont accès à un cursus complet avec des cours en anglais. Ces bourses leur permettent de supporter le coût de la vie et du logement à Paris. Pour information, les étudiants étrangers contribuent pour un tiers aux thèses préparées à l'IPGP. Cette initiative est fortement soutenue par l'IDEX d'Université de Paris. Même si ce programme a été reporté en 2020, nous avons réussi à attirer cinq étudiants étrangers pour l'année académique 2020-2021.

The year 2020 was marked by the acceptance of Circle U by the European Commission as well as the associated project ERIA (Empowering Research and Innovation Actions within Circle U) in the framework of the SWAFS (Science With and For Society) programme. Circle U is a model of inclusive, research-intensive and interdisciplinary European University. It is a consortium of seven European universities: University of Oslo (Norway), Paris (France), Aarhus (Denmark), Belgrade (Serbia), Humboldt of Berlin (Germany), King's College of London (UK) and Catholic University of Louvain (Belgium). The IPGP plays a key role in Circle U since Jérôme Gaillardet is the Université de Paris representative for one Work Package "Teaching and Research in connection with Society".

In spite of the sanitary crisis, several tools continued:

MIEM fellowships:

For attracting the best Master and PhD students, annual fellowships (MIEM) are 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. For information, foreign students contribute for one third to theses prepared at the IPGP. This initiative is strongly supported by the IDEX of Université de Paris. Even though this programme was postponed in 2020, we managed to attract five foreign students for the academic year 2020-2021.

Coordination du programme d'invitation :

Les professeurs invités contribuent efficacement aux projets scientifiques communs et aux échanges d'étudiants. Plus de 40 professeurs ou chercheurs du monde entier ont été invités durant l'année académique 2019-2020 pour au moins un mois. Un formulaire est émis pour chacun d'entre eux et envoyé à tous les membres de l'IPGP, résumant leur projet de recherche, le scientifique invitant et le lieu de leur bureau pendant leur séjour. Malheureusement, seuls quatre de ces scientifiques invités se sont finalement rendus à l'IPGP l'année dernière.

Coordination of the invitation programme:

The invited professors efficiently contribute to joint scientific projects and exchange of students. More than 40 professors or researchers from all over the world were invited during the academic year 2019-2020 for at least one month. A form is issued for each one and sent to all the IPGP members, summarizing their research project, the inviting scientist and their office location during their stay. Unfortunately, only four of these invited scientists finally went to the IPGP last year.

L'IPGP accueille le biogéochimiste américain Stephen Porder, lauréat de la chaire Fulbright-Tocqueville 2021 :

Titulaire de la prestigieuse chaire Fulbright-Tocqueville 2021, Stephen Porder a été invité par Jérôme Gaillardet à rejoindre l'IPGP dès le mois de septembre 2020 au sein de l'équipe GEE (Géochimie des Enveloppes Externes). Cette bourse permet à un chercheur américain de venir passer une année dans un établissement d'enseignement supérieur et de recherche français.



The IPGP welcomes the American biogeochemist Stephen Porder, winner of the Fulbright-Tocqueville Distinguished Chair Award 2021:

Stephen Porder, recipient of the prestigious Fulbright-Tocqueville Distinguished Chair 2021, was invited by Jérôme Gaillardet to join the GEE (External Envelopes Geochemistry) team at the IPGP in September 2020. This Chair allows an American researcher to spend six months researching and teaching at a French higher education and research institution.

Stephen is a professor of ecology and evolutionary biology at Brown University in Providence, Rhode Island. His work

focuses on understanding the limits of growth in tropical rainforests, the environmental challenges of industrial agriculture, and the social, economic and ecological barriers to large-scale tropical forest reforestation. His work at the intersection of geology, geomorphology and ecology led to projects at the Luquillo Critical Zone Observatory in Puerto Rico, where his collaboration with Jérôme Gaillardet began.



Scientifiques invités 2020 2020 visiting scientists

Invité Guest	Affiliation Affiliation	Invitant Host	Équipe Team
CRESPI Mattia	Sapienza Università di Roma, Italy	OCCHIPINTI Giovanni	Planétologie et sciences spatiales Planetology and space sciences
MORGAN Dan	Institute of Geophysics and Tectonics, University of Leeds, UK	BOUDON Georges	Systèmes volcaniques Volcanic systems
NARBONA-REINA Gladys	Universidad de Sevilla, Spain	MANGENEY Anne	Sismologie Seismology
SCHIMMEL Martin	Institute of Earth Sciences Jaume Almera (ICTJA-CSIC), Barcelona, Spain	STUZMANN Eléonore	Sismologie Seismology



Le site de CarbFix en Islande où se sont déroulés les travaux de géomicrobiologie.
The CarbFix site in Iceland where the geomicrobiology work took place.
© Ménez/Cardon, IPGP



Partenariats Partnerships

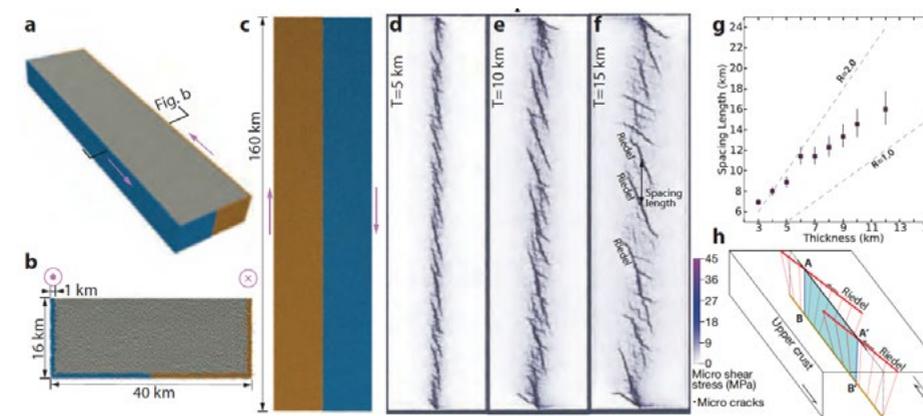
En 2020, l'activité de l'institut en partenariat avec le secteur industriel est restée soutenue et a fait l'objet de réussites scientifiques et techniques partagées.

In 2020, the Institute's activity in partnership with the industrial sector remained strong with shared scientific and technical successes.

SIGMA-2

Dans le cadre du projet SIGMA-2 mené par un consortium international d'énergéticiens, EDF et l'équipe "Tectonique et mécanique de la lithosphère" de l'IPGP ont signé un partenariat visant à mieux comprendre les paramètres régissant la formation et la structuration des failles continentales. Ce travail s'appuie sur le développement à l'IPGP de modélisations en éléments discrets, une méthodologie encore peu utilisée en sciences de la Terre. Ce partenariat, d'une durée de deux ans, finance une post-doctorante. L'équipe de tectonique de l'IPGP joue également un rôle d'expert au sein du conseil scientifique de SIGMA-2 pour l'évaluation d'autres actions menées par ce programme.

In the framework of the SIGMA-2 project led by an international consortium of companies related to power generation, the EDF company and the IPGP's Lithosphere Mechanics and Tectonics team are engaged in a partnership program aimed at better understanding the parameters governing the formation and structuring of continental faults. This work is based on the development at the IPGP of discrete element modelling, a methodology still little used in Earth sciences. This two-year partnership funds a post-doctoral fellow. In addition, the IPGP tectonics team is also called upon as an expert within the SIGMA-2 programme's scientific council for the evaluation of other actions carried out by this programme.



L'épaisseur du milieu fissuré est le facteur clé qui contrôle la longueur du segment et l'écartement des failles coulissantes. Ces résultats sont ensuite confrontés aux observations géologiques et aux résultats expérimentaux analogues.

The thickness of the brittle medium is the key factor that controls the fault segment and spacing length in strike-slip faulting environments. These results are then confronted with geological observations and analogue experimental results.

© SIGMA-2



Contact : klinger@ipgp.fr

En savoir plus / Read more: www.sigma-2.net

ETN SaltGiant

L'IPGP coordonne le projet ETN SaltGiant, qui étudie la formation du géant salifère de Méditerranée, un des plus grands dépôts de sel de l'Histoire de la Terre. Ce réseau scientifique est constitué de 23 partenaires académiques et dix entreprises privées provenant de 11 pays différents.

Il comprend :

- des travaux géologiques et géochimiques de terrain ;
- des mesures et des expériences de laboratoire ;
- de la modélisation numérique à des échelles spatiales et temporelles variées ;
- la collecte et l'analyse de données empiriques en sciences sociales afin de mieux comprendre les problématiques clés liées à la mise en place du géant salifère méditerranéen telles que : l'évolution de bassins marginaux en géants salifères, les risques liés au forage océanique industriel, le développement d'une biosphère microbienne profonde, l'impact de récentes découvertes de gaz naturel sur la géo-économie de la région méditerranéenne, l'histoire de l'océanographie, etc.

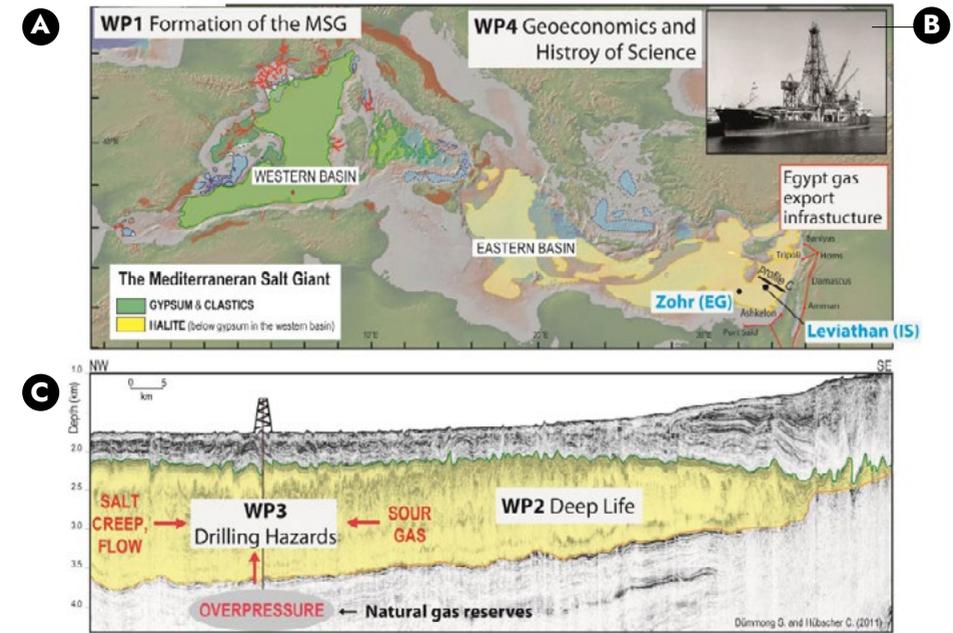
The IPGP is the scientific coordinator of the SaltGiant ETN, a cross-disciplinary network of natural and social scientists dedicated to understanding the formation of the Mediterranean Salt Giant, one of the largest salt deposits on Earth. SaltGiant brings together 23 academic organizations and 10 private companies from 11 countries.

SaltGiant combines:

- geological and geochemical field work
- laboratory measurements and experiments
- numerical modelling at a wide range of spatial and temporal scales
- empirical social sciences data collection and analysis with the goal of contributing to improved understanding of key salt-related issues such as: the evolution of marginal seas into salt giants, the development of drilling hazards, the development of a deep salt-related microbial biosphere, the impact of recent Mediterranean natural gas discoveries on the geo-economics of the Mediterranean region, the history of oceanography, etc.



Contact : aloisi@ipgp.fr



A Carte de l'étendue actuelle du géant salifère de Méditerranée (MSG), déterminée par des levés sismiques et des affleurements terrestres. On y voit la distribution des sels d'halite et de gypse, les deux sels d'évaporite les plus abondants dans le MSG (Lofi et al., in preparation), ainsi que les positions des gisements géants de gaz naturel offshore récemment découverts de Zohr (Égypte) et de Léviathan (Israël). Ces découvertes modifient l'équilibre géoéconomique et géopolitique de la région ; **B** Navire de forage Glomar Challenger du Deep Sea Drilling Project (DSDP) qui a découvert le MSG en 1970 (Hsü et al., 1973) ; **C** Section sismique à travers le bassin du Levantin montrant le MSG en jaune. L'écoulement et la déformation du sel, ainsi que la surpression sous-saline, constituent des risques de forage. Au sein du MSG, une énigmatique biosphère profonde de microbes pose des questions fondamentales sur les limites de la vie et génère un risque de forage et d'exploitation minière par la production de H₂S toxique et corrosif (« gaz acide »).

A Map of the present-day extent of the Mediterranean Salt Giant (MSG) as identified through seismic surveys and land outcrops. We can see the areal distribution of halite and gypsum salts, the two most abundant evaporite salts in the MSG (Lofi et al., in prep.), and the positions of the recently discovered Zohr (Egypt) and Leviathan (Israel) offshore giant natural gas fields. These discoveries are changing the geo-economic and geo-political balance of the region; **B** The Deep Sea Drilling Project (DSDP) drilling vessel Glomar Challenger that discovered the MSG in 1970 (Hsü et al., 1973); **C** Seismic section across the Levantine basin showing the MSG in yellow. Flowing and deforming salt, and subsalt overpressure, are drilling hazards. Within the MSG, an enigmatic deep biosphere of microbes poses fundamental questions on the limits of life and generates a drilling and mining hazard via the production of toxic and corrosive H₂S ("sour gas").

© SaltGiant

CRITEX

Une prestation de service a été signée en mai 2020 entre le projet Equipex CRITEX coordonné par Jérôme Gaillardet à l'IPGP et la startup EXTRALAB. Trois "River Lab" ont été développés, des prototypes de laboratoires de terrain qui mesurent en continu et à haute fréquence la composition chimique de rivières du réseau OZCAR. La société EXTRALAB, créée et dirigée par Paul Flourey suite à sa thèse à l'IPGP, assure la gestion des River Lab, de l'acquisition des données jusqu'au développement d'une solution décentralisée et collaborative de gestion de ces données. Par ailleurs, le partenariat noué entre l'IPGP, l'INRAE Rennes et l'Université de Strasbourg permettra la mise en place d'un "Internet des River Lab" à l'échelle mondiale.

A subcontract has been signed between the programme of excellence CRITEX coordinated by Jérôme Gaillardet from the IPGP and the company EXTRALAB. Three lab-in-the-field prototypes named "River Labs" have been developed and deployed in different observatories of the OZCAR network allowing the continuous and high-frequency measure of the chemical composition of rivers. The service offered by this startup, created as a follow up of Paul Flourey's PhD at the IPGP, is to take charge of the management of the three River Labs, from data acquisition to the development of a decentralized and collaborative data management solution. The partnership woven between the IPGP, INRAE Rennes and the University of Strasbourg will lead to the implementation of a "River Lab Internet" on a global scale.

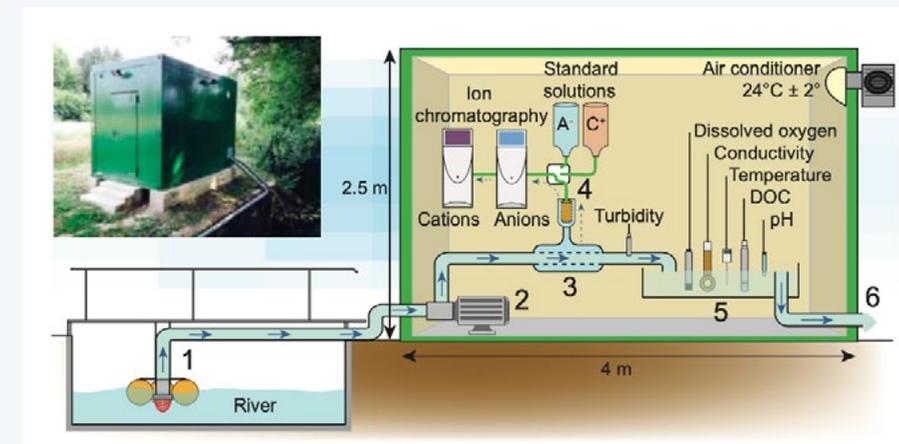


Diagramme du laboratoire de la rivière Orgeval. Les flèches bleues en gras indiquent le circuit primaire de l'eau non filtrée. Les flèches pointillées indiquent l'eau filtrée fournie aux instruments IC. Diagram of the Orgeval River Lab. Bold blue arrows indicate the primary circuit of unfiltered water. Dashed arrows indicate filtered water supplied to IC instruments.

© CRITEX



Contact : gaillard@ipgp.fr
En savoir plus / Read more: www.critex.fr

Science 4 Clean Energy

L'IPGP était partenaire du projet Science 4 Clean Energy, financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne. Ce projet de 3 ans qui s'est achevé en 2020 visait à évaluer, quantifier et réduire l'impact et les risques environnementaux associés aux activités de géoingénierie de subsurface telles que le stockage géologique du CO₂, la géothermie et l'exploitation de ressources énergétiques non conventionnelles.

L'IPGP s'est en particulier investi autour de deux axes :

- la compréhension de l'impact des injections de gaz sur les espèces microbiennes de subsurface et la caractérisation des réactions biogéochimiques qui en résultent, à travers la mise au point d'une approche multimodale novatrice permettant de traquer les écosystèmes microbiens dans les roches basaltiques. La reconstruction de génomes microbiens a également permis de mieux documenter les cycles biogéochimiques du carbone, du fer et du soufre dans un aquifère basaltique géo-opéré, ainsi que le fonctionnement encore mal connu de la biosphère profonde.
- le pilotage de la rédaction de deux publications de géo-éthique autour de ces aspects de géoingénierie, fournissant un ensemble de recommandations permettant de limiter les risques potentiels identifiés et de proposer des technologies qui soutiennent la croissance de nos sociétés tout en réduisant notre empreinte environnementale.

The IPGP was one of the partner in the Science 4 Clean Energy project, funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation program. This 3-year project, which ended in 2020, aimed at assessing, quantifying and reducing the environmental impact and risks associated with subsurface geoengineering activities such as geological storage of CO₂, geothermal energy or the exploitation of unconventional energy resources.

The IPGP has in particular invested in two main areas:

- understanding the impact of gas injections on subsurface microbial species and characterizing the resulting biogeochemical reactions, through the development of an innovative multimodal approach to track microbial ecosystems in basaltic rocks. The reconstruction of microbial genomes has also allowed to better document the biogeochemical cycles of carbon, iron and sulfur in a geo-operated basaltic aquifer, as well as the still poorly understood functioning of the deep biosphere.
- leading the writing of two geo-ethics publications around subsurface geoengineering, thus providing a set of recommendations to limit the potential risks identified and to propose technologies that support the growth of our societies while reducing our environmental footprint.



Contact : menez@ipgp.fr

En savoir plus / Read more: science4cleanenergy.eu



Le site de CarbFix en Islande où se sont déroulés les travaux de géomicrobiologie.
The CarbFix site in Iceland where the geomicrobiology work took place.

© Ménez/Cardon, IPGP



© Mathieu Alonso



Vie de l'établissement Institution's life



© La Tribune des Antilles

Signature de deux conventions entre l'IPGP et la Collectivité territoriale de Martinique pour la mise à disposition du nouveau bâtiment de l'OVSM-IPGP et le renforcement des actions d'observation volcanologique et sismologique du territoire. Avec de gauche à droite : Fabrice Fontaine, directeur de l'OVSM-IPGP, Marc Chaussidon, directeur de l'IPGP, Alfred Marie-Jeanne, président du conseil exécutif de la CTM et Louis Boutrin, conseiller exécutif de la CTM.

Signature of two agreements between the IPGP and the Collectivité territoriale de Martinique for the provision of the new OVSM-IPGP building and the reinforcement of the volcanological and seismological observation actions of the territory. With from left to right: Fabrice Fontaine, director of the OVSM-IPGP, Marc Chaussidon, director of the IPGP, Alfred Marie-Jeanne, president of the executive council of the CTM and Louis Boutrin, executive councillor of the CTM.

Page de gauche :
Tournage de l'émission TV « Le Monde de Jamy » axée sur les volcans et les séismes, avec les équipes de l'OVPF-IPGP sur le Piton de la Fournaise.

Left page:
Shooting of the TV show "Le Monde de Jamy" which focuses on volcanoes and earthquakes, with the OVPF-IPGP teams on the Piton de la Fournaise.



Tournage d'une vidéo pour l'émission TV « E=M6 » sur le décryptage du phénomène de « mer de ponces » avec Claude Jaupart.

Shooting of a video for the TV show "E=M6" on the deciphering of the "sea of pumice" phenomenon with Claude Jaupart.



Vœux du directeur et galette de début d'année 2020, un des derniers événements organisés sur le site Cuvier avant le début de la pandémie de Covid-19.

Director's greetings and galette at the beginning of the year 2020, one of the last events organised on the Cuvier site before the start of the Covid-19 pandemic.



Conférence de presse de lancement de Udice, association de grandes universités de recherche françaises.

The launching press conference of Udice, an association of major French research universities.



Atelier « **Séismes, Avalanches et Sédiments marins** », au **Palais de la Découverte**, présenté et animé par des scientifiques de l'IPGP et leurs collègues dans le cadre du programme « 1 chercheur-e, 1 manip ».

Workshop "**Earthquakes, Avalanches and Marine Sediments**" at the **Palais de la Découverte**, presented and led by IPGP scientists and their colleagues in the programme "1 researcher, 1 experiment".



Plusieurs équipes de l'IPGP ont participé au **Festival des Idées 2020 de l'Alliance Sorbonne Paris Cité** autour du thème « nouvelles normalités ».

Several IPGP teams participated in the **Festival of Ideas 2020 of the Alliance Sorbonne Paris Cité** around the theme "new normalities".



Projection de courts métrages à l'IPGP et remise des prix du concours **Symbiose du festival Pariscience 2020**.

Screening of the short films at the IPGP and prize-giving ceremony of the **Symbiose competition of the Pariscience 2020 festival**.



Livraison aux hôpitaux parisiens de centaines de masques, gants, surchaussures, charlottes et blouses de protection collectés dans les laboratoires de l'IPGP au début de la crise sanitaire.

Delivery to Parisian hospitals of hundreds of masks, gloves, overshoes, gowns and protective coats collected in the IPGP laboratories at the beginning of the health crisis.



Fête des personnels d'Université de Paris. Protocole sanitaire oblige, en 2020, l'événement s'est déroulé entièrement en ligne.

Université de Paris staff party. Due to health protocol, in 2020, the event was held entirely online.



Interventions de scientifiques du REVOSIMA auprès de la population mahoraise au cours de la « **Semaine du volcan** » à Mayotte.

Interventions for the population by REVOSIMA scientists during the "**Volcano Week**" in Mayotte.

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

Imprimerie Chirat, 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, Adobe Stock, M.Alonso, CNRS, Critex, Daudon et al., A.Finizola, Gastine et al., E.Gérard, EOST, Fondation Université de Paris, IFREMER, IMPMC, A.Kircher, Knapmeyer et al., L.Labenne, La Tribune des Antilles, Lecocq et al., P.Lognonné et al., Menant et al., B.Ménez, MNHN, Moynier, MPQ, NASA MGS MOLA, NASA MRO HiRISE, Orange, OVPF, OVSG, OVSM, Palais de la Découverte, Revosima, Ropp et al., SaltGiant, SIGMA-2, Udice, Unsplash, USGS, Wikimedia.

–

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

Chirat 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

Banque d'images IPGP, Adobe Stock, M.Alonso, CNRS, Critex, Daudon et al., A.Finizola, Gastine et al., E.Gérard, EOST, Fondation Université de Paris, IFREMER, IMPMC, A.Kircher, Knapmeyer et al., L.Labenne, La Tribune des Antilles, Lecocq et al., P.Lognonné et al., Menant et al., B.Ménez, MNHN, Moynier, MPQ, NASA MGS MOLA, NASA MRO HiRISE, Orange, OVPF, OVSG, OVSM, Palais de la Découverte, Revosima, Ropp et al., SaltGiant, SIGMA-2, Udice, Unsplash, USGS, Wikimedia.

–

THANK YOU!

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





Le 4 décembre 2020 l'OVSM-IPGP préconise le passage en niveau de vigilance volcanique jaune de la Montagne Pelée.
On December 4, 2020, the OVSM-IPGP recommended that Montagne Pelée be placed on yellow volcanic alert.

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