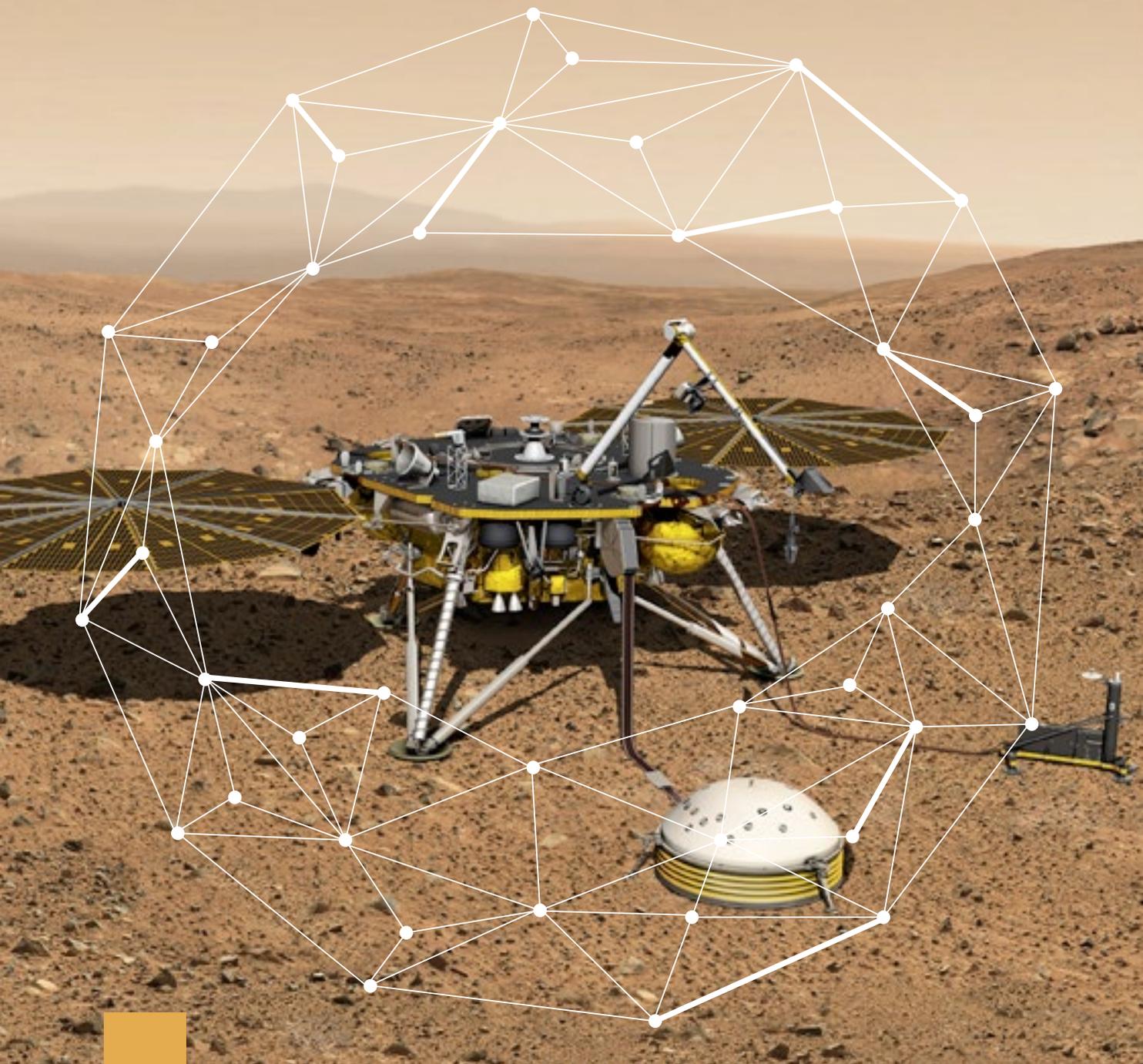


Institut de physique du globe de Paris



2018

Rapport annuel
Annual report



Université de Paris

Sommaire

Contents

- 2 • Éditoriaux
Editorials
- 5 • L'Université de Paris
The University of Paris
- 6 • L'établissement IPGP
The IPGP institution
- 8 • Chiffres clés
Key figures
- 9 • Observatoires, thèmes et équipes
Observatories, themes and teams
- 10 • Effectifs
Staff
- 12 • Vie de la recherche
Research life
- 16 • Prix et distinctions
Awards and honours
- 18 • Nouveaux chercheurs
et enseignants-chercheurs
New researchers
and teachers-researchers
- 22 • Intérieurs de la Terre et des planètes
Earth and planetary interiors
- 28 • Risques naturels
Natural hazards
- 36 • Système Terre
Earth system science
- 44 • Origines
Origins
- 52 • InSight
InSight
- 56 • Plateformes de recherche
Research platforms
- 58 • Observatoires
Observatories
- 76 • La Soufrière de Guadeloupe,
un volcan en phase de réactivation ?
The Soufrière of Guadeloupe,
a volcano in a state of unrest?
- 82 • Réseau des observatoires
et stations de l'IPGP
Network of the IPGP
observatories and stations
- 84 • Enseignement
Teaching
- 91 • Congrès des doctorants
PhD student conference
- 92 • Coup d'oeil sur deux thèses
Two theses at a glance
- 94 • Relations internationales
International relationships
- 98 • Partenariats
Partnerships
- 102 • Vie de l'établissement
Institution's life

Editorial

Marc Chaussidon

Directeur de l'IPGP

IPGP Director

« L'année 2018 marque une étape déterminante pour l'institut de physique du globe de Paris, qui rejoint l'Université de Paris créée par la fusion des universités Paris Descartes et Paris Diderot et par notre intégration. Pour l'IPGP, bientôt centenaire (création en 1921), cette évolution représente une volonté d'ouverture en étant moteur dans les changements profonds que connaissent l'enseignement supérieur et la recherche français. L'Université de Paris, dont le décret de création a été publié le 20 mars 2019, sera dans les mois à venir une des toutes premières universités de recherche françaises et disposera d'une large visibilité internationale. L'IPGP trouvera ainsi toutes sortes d'opportunités nouvelles pour développer des enseignements et une recherche aux interfaces entre différents domaines et jouer un rôle clé face aux enjeux scientifiques et sociétaux majeurs de notre époque.

L'année 2018 fut également celle des évaluations par l'HCERES de notre établissement et de nos équipes de recherche et observatoires. Ces équipes associent à l'IPGP le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) via son Institut des sciences de l'univers (INSU), l'université Paris Diderot (désormais Université de Paris), l'université de la Réunion et un partenaire, le Centre national des études spatiales (CNES). Ces évaluations, très positives, ont reconnu l'excellence et l'originalité des recherches menées au sein de l'institut. Nos unités de recherche et d'observation (UMR et UMS) ont été renouvelées avec, depuis le 1^{er} janvier 2019, l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) qui nous a rejoint en tant que cotutelle de l'UMR IPGP. Par ailleurs, nous sommes particulièrement satisfaits d'avoir pu signer en 2018 la première convention cadre avec le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), avec

qui nous avons déjà de nombreux projets communs, ainsi que d'avoir renouvelé notre convention cadre avec le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), partenaire de longue date.

Ce rapport met en lumière certains des résultats scientifiques originaux acquis au cours de l'année écoulée. Ces derniers sont présentés à travers les quatre grandes thématiques de recherche de l'institut : Intérieurs de la Terre et des planètes, Risques naturels, Système Terre et Origines. L'honneur de la couverture de ce rapport revient évidemment cette année au sismomètre SEIS, déployé avec succès sur Mars par la sonde NASA-CNES InSight qui s'est posée sur la planète rouge le 26 novembre 2018. SEIS a été conçu et développé à l'IPGP, en partenariat avec le CNES, par l'équipe de planétologie et sciences spatiales qui a commencé cette aventure dès la fin des années 1980 ! L'IPGP explorera en 2019 pour la première fois la structure interne de Mars et le logo de l'IPGP restera visible sur Mars, avec ceux des partenaires d'InSight, des années jusqu'à ce que les vents martiens le recouvrent de poussière.

Vous découvrirez également dans ce rapport un focus sur la réactivation de la Soufrière de Guadeloupe, qui s'est accélérée après plusieurs années de lent regain d'activité. Les observations faites par l'observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe (OVSG-IPGP) montrent un changement de régime du volcan qui a atteint en avril 2018 son plus haut niveau depuis la fin de l'éruption de 1976-1977. Cette réactivation souligne le rôle clé que joue l'IPGP en étant responsable de l'observation continue des trois volcans actifs français aux Antilles et à la Réunion. Le Piton de la Fournaise a d'ailleurs connu en 2018 plus de 80 jours d'éruption qui ont une fois de plus fortement mobilisé toute l'équipe de l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF-IPGP).

Bonne lecture et bienvenue à l'institut de physique du globe de Paris ! »



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

"The year 2018 marks a decisive stage for the Institut de physique du globe de Paris, which joins the Université de Paris created by the merger of Paris Descartes and Paris Diderot Universities as well as our integration. For the IPGP, which is nearly 100 years old (created in 1921), this evolution represents a commitment to a broader perspective by driving profound changes in French higher education and research. The Université de Paris, whose founding decree was published on 20 March 2019, will position itself as one of the leading French research universities and will have broad international visibility. The IPGP will thus find all kinds of new opportunities to develop teaching and research at the intersections between different fields and play a key role in addressing the major scientific and societal challenges of our time.

2018 was also the year of HCERES' evaluations of our institution and our research and observatory teams. These teams are a joint undertaking between the IPGP and the French National Centre for Scientific Research (CNRS) via its Institut des Sciences de l'Univers (INSU), Université Paris Diderot (now Université de Paris), Université de la Réunion and a partner, the French National Centre for Space Studies (CNES). These very positive evaluations recognised the excellence and originality of the research conducted within the Institute. Our research and observation units (UMR and UMS) have been renewed since 1 January 2019 with the Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), which has joined us as a joint venture of the IPGP UMR. In addition, we are particularly pleased to have been able to sign the first framework agreement with the French Geological Survey (BRGM) in 2018, with which we already have many joint projects, as well as to have renewed our framework agreement with the French Alternative Energies and Atomic Energy

Commission (CEA), a long-standing partner.

This report highlights some of the original scientific results achieved over the past year. These are presented through the Institute's four main research themes: Interior of the Earth and the planets, Natural hazards, Earth system and Origins. The honour of appearing on the cover of this report goes to the SEIS seismometer, successfully deployed on Mars by the NASA-CNES InSight probe that landed on the Red Planet on 26 November 2018. SEIS was designed and developed at the IPGP, in partnership with the CNES, by the planetology and space science team that began this adventure in the late 1980s! The IPGP will explore the internal structure of Mars for the first time in 2019 and the IPGP logo, along with those of its InSight partners, will remain visible on Mars for years until the Martian winds cover it with dust.

This report also looks at the reactivation of the Soufrière de Guadeloupe, which has accelerated after several years of slowly increasing activity. Observations by the Volcanological and Seismological Observatory of Guadeloupe (OVSG-IPGP) show a change in the volcano's regime, which in April 2019 reached its highest level since the end of the 1976-1977 eruption. This reactivation emphasises the key role played by the IPGP, being responsible for the continuous observation of the three active French volcanoes in the West Indies and on Reunion Island. In 2018, the Piton de la Fournaise experienced more than 80 days of eruption, which once again mobilised the entire team of the Volcanological Observatory of Piton de la Fournaise (OVPF-IPGP).

Happy reading and welcome to the Institut de physique du globe de Paris!"

Editorial

Olivier Peyret

Président du conseil d'administration

Chairman of the Board of Directors

Président de Schlumberger France

Chairman of Schlumberger France



« À l'heure où j'écris ces quelques mots, notre institut, par la voix de son conseil d'administration, a unanimement décidé d'ouvrir une nouvelle page de son histoire. En effet, 2019 restera sans nul doute une année charnière dans la vie de l'IPGP, l'année où notre institut s'associe aux universités Paris Descartes et Paris Diderot pour former l'Université de Paris.

Cette nouvelle université, de par l'excellence des disciplines qu'elle combine, figurera parmi les meilleures en France et dans le monde. Son ambition est grande et l'envie de construire ensemble un espace du savoir unique et riche en mutualisant ses ressources tout en préservant l'identité de chacun porte un formidable avenir.

L'IPGP y tient un rôle de choix et renforce ainsi sa position de pôle français de tout premier plan pour l'enseignement et la recherche en sciences de la Terre, des planètes et de l'environnement - thématiques et disciplines ô combien d'actualité. Sachons saisir ce moment unique pour créer un nouvel élan et ainsi attirer toujours plus d'étudiants vers nos disciplines, pour développer une science toujours plus pertinente et pour répondre toujours mieux à nos missions d'observation et de surveillance des risques naturels majeurs. »

"As I write these few words, our Institute, through its Board of Directors, has unanimously decided to open a new page in its history. 2019 will undoubtedly remain a pivotal year in the life of the IPGP: the year in which our Institute joins forces with Paris Descartes and Paris Diderot universities to form the Université de Paris.

This new university, by virtue of the excellence of the disciplines it combines, will be among the best in France and in the world. Its ambition is great and the desire to build together a uniquely rich space of knowledge by pooling its resources while preserving the identity of each entity is bound to have a tremendous future.

The IPGP plays a key role in this, thus strengthening its position as a leading French centre for teaching and research in Earth, planetary and environmental sciences - subjects and fields that are particularly topical.

Let us seize this unique opportunity to create a new dynamism and thus attract more and more students to our fields, to develop an increasingly relevant science, and to ever better fulfil our missions of observing and monitoring major natural hazards."



Une des premières universités de recherche intensive françaises

Couvrant l'ensemble des champs disciplinaires et notamment réputée pour celui des sciences de la Terre et des planètes, l'Université de Paris se positionne parmi les établissements français et internationaux les plus prestigieux : recherche au meilleur niveau dans le respect des règles éthiques et déontologiques, formation supérieure d'excellence, dynamisme de la vie étudiante, soutien à l'innovation et au transfert, construction d'un véritable espace européen de la recherche et de la formation.

L'organisation de l'Université de Paris doit favoriser le développement d'initiatives scientifiques et pédagogiques transversales entre ses composantes. L'objectif étant de tirer parti de la richesse disciplinaire des communautés et de construire une offre de formation originale, depuis le premier cycle jusqu'au doctorat.



FOCUS



3+1

facultés : Santé, Sciences, Sociétés et humanités
+ 1 établissement composante : l'IPGP
faculties: Health, Science, Society and humanities
+ 1 component institute: the IPGP


61 000
étudiants
students


142
laboratoires
laboratories


4 500
enseignants-chercheurs
teacher-researchers


3 000
personnels administratifs
et techniques
administrative
and technical staff

One of the first intensive French research universities

Covering all fields of study and in particular known for Earth and planet sciences, the Université de Paris is one of the most prestigious French and international institutions: research at the highest level while respecting ethical and deontological rules, higher education for excellence, dynamism in student life, support for innovation and transfer, and the construction of a genuine European research and education area.

The organization of the Université de Paris must encourage the development of transversal scientific and pedagogical initiatives between its components. The objective is to take advantage of the disciplinary richness of the communities and to build an original training offer, from undergraduate to PhD program.

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 la COMUE Université Sorbonne Paris Cité (et future alliance SPC) avec les universités Paris Descartes, Paris Diderot, Paris 13, Sorbonne Nouvelle, ainsi que l'EHESP, Sciences Po, l'Inalco et la FMSH. Il est tutelle de l'UMR 7154 qui regroupe toutes les activités de recherche, avec comme cotutelles le CNRS, les universités Paris Diderot (Université de Paris à partir de janvier 2020) et de la Réunion et l'IGN. L'IPGP est aussi tutelle de l'UMS 3454, qui regroupe toutes les activités d'observation, avec le CNRS cotutelle. En outre, l'IPGP est un laboratoire spatial du CNES.

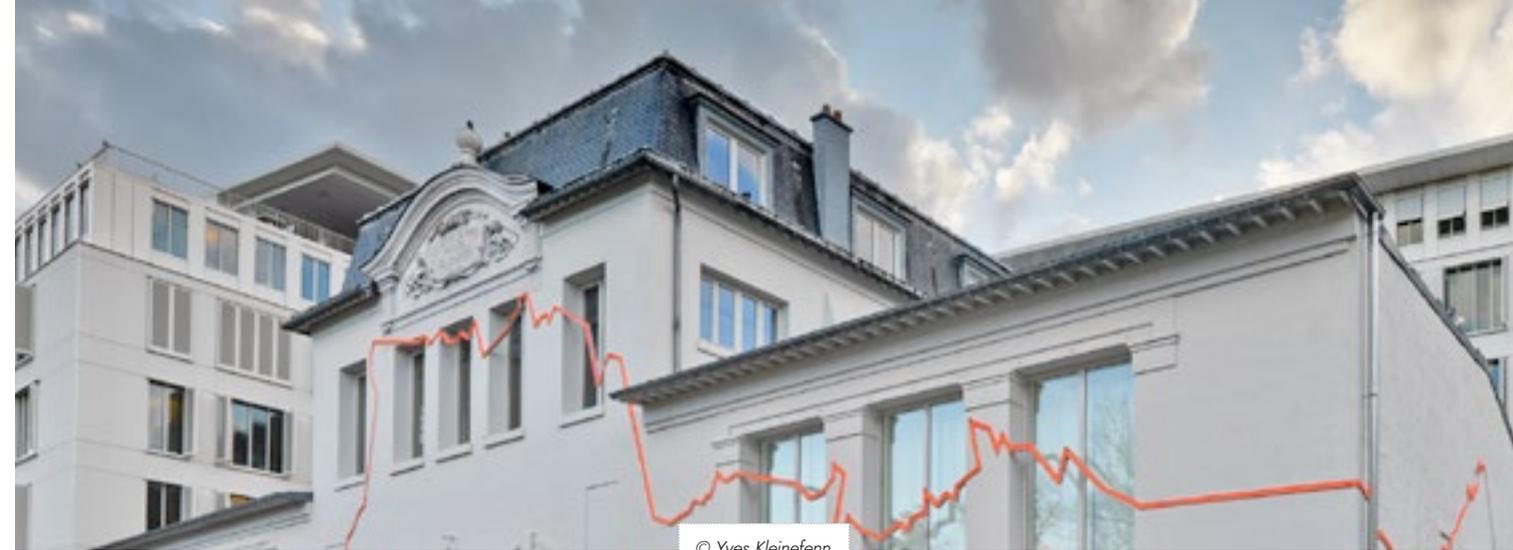
Il rassemble plus de 500 personnes : chercheurs recrutés dans le monde entier, ingénieurs, techniciens, agents administratifs, post-doctorants et doctorants de tous pays partageant la même passion pour les sciences de la Terre, des planètes et de l'environnement. De nombreux accords de coopération sont mis en place avec des institutions étrangères prestigieuses, permettant des échanges scientifiques permanents dans le monde entier.

Organisme de recherche en géosciences de renommée mondiale, l'IPGP étudie la Terre et les planètes depuis le noyau jusqu'aux enveloppes fluides les plus superficielles, à travers l'observation, l'expérimentation et la modélisation. Une attention toute particulière est portée aux observations de longue durée qui sont essentielles pour l'étude des systèmes naturels. L'IPGP a la charge de services d'observation labellisés en volcanologie, sismologie, magnétisme, gravimétrie et érosion à

The Institut de physique du globe de Paris is a major institution for higher education and research, piloted by an executive board, a scientific council and a pedagogical council. Component institute of the new Université de Paris, it is also a member of the COMUE Université Sorbonne Paris Cité (and future SPC Alliance) with the Paris Descartes, Paris Diderot, Paris 13 and Sorbonne Nouvelle universities, as well as the EHESP, Sciences Po, the Inalco and the FMSH. It is the guardian of the UMR 7154, which brings together all research activities, with the CNRS, the Université Paris Diderot (Université de Paris from January 2020), Université de la Réunion and the IGN as co-guardians. The IPGP is also the guardian of UMS 3454, which brings together all observation activities, with the CNRS as a co-guardian. In addition, the IPGP is a CNES space laboratory.

It brings together more than 500 people: researchers recruited from all over the world, engineers, technicians, administrative staff, postdoctoral fellows and PhD students from all countries who share the same passion for Earth, planet and environmental sciences. The IPGP has numerous cooperation agreements with prestigious foreign institutions, making it possible to have ongoing scientific exchanges all across the world.

A world-renowned geosciences organisation, the IPGP studies the Earth and the planets from their core to their outermost fluid envelopes through observation, experimentation and modelling. Particular focus is placed on long-term observations, which are essential in the study of natural systems. The IPGP is in charge of certified observation services in volcanology, seismology, magnetism, gravimetry and erosion through its permanent observatories in Guadeloupe, Martinique and Reunion Island and in Chambon-la-Forêt in mainland France. The IPGP



© Yves Kleinfenn

travers ses observatoires permanents sur les îles de Guadeloupe, de la Martinique, de la Réunion et à Chambon-la-Forêt (France métropolitaine). Par ailleurs, l'IPGP équipe et entretient, en partenariat avec l'EOST, deux réseaux géophysiques mondiaux qui suivent les variations du champ magnétique (réseau INTERMAGNET) et l'activité sismique du globe (réseau GEOSCOPE).

L'IPGP héberge des moyens de calcul puissants et des installations expérimentales et analytiques de dernière génération et bénéficie d'un soutien technique de premier plan. Sa structure souple facilite les interactions entre les 16 équipes de recherche travaillant ensemble sur les quatre grandes thématiques de l'institut : Intérieurs de la Terre et des planètes, Risques naturels, Système Terre et Origines.

L'IPGP est responsable de plusieurs formations en licence, master et doctorat, en étroite collaboration avec l'université Paris Diderot et dès l'année prochaine avec l'Université de Paris.

also equips and maintains, in partnership with the EOST, two global geophysics networks that monitor variation in the magnetic field (INTERMAGNET network) and seismic activity (GEOSCOPE network) around the globe.

The IPGP hosts powerful computational resources and next-generation experimental and analytical facilities with top-tier technical support. Its flexible structure facilitates interactions between the 16 research teams working together on the Institute's four main focusses: Earth and planetary interiors, Natural hazards, Earth system science and Origins.

The IPGP is responsible for several undergraduate, master's and PhD degrees in close collaboration with the Université Paris Diderot and from next year with the Université de Paris.



© Yves Lion

Chiffres clés

Key figures



1883

Premières mesures du champ magnétique à Saint-Maur-des-Fossés
First measurements of the magnetic field at Saint-Maur-des-Fossés



2

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



38,9M€

Budget total consolidé pour l'année 2018, dont 62% de masse salariale et 27% de ressources propres sur contrats
Consolidated total budget for the year 2018, including 62% of payroll and 27% of generated-income on contracts



67

chercheurs invités étrangers en 2017-2018
international visiting researchers in 2017-2018



3

observatoires volcanologiques et sismologiques
volcanological and seismological observatories



1

observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles : OBSERA
observatory of water and erosion in the Antilles: OBSERA



360

publications

pour l'année 2018 dont 15 dans des revues prestigieuses telles que Nature et Science
for the year 2018 whose 15 in prestigious journals such as Nature and Science



4

grands thèmes de recherche
major research themes



12

observatoires magnétiques dont 1 nouveau à Édéa au Cameroun
magnetic observatories which 1 new in Édéa in Cameroon



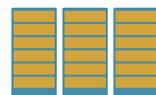
3

plateformes instrumentales de recherche : la plateforme analytique PARI, la plateforme de calcul S-CAPAD et les sismomètres fond de mer INSU-IPGP
instrument platforms research: the analytical platform PARI, the S-CAPAD calculation platform and the INSU-IPGP Ocean-Bottom seismometers



16

équipes de recherche
research teams



1

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

Observatoires, thèmes et équipes

Observatories, themes and teams

Au 1^{er} septembre 2019 / As of September 1, 2019

Observatoires / Observatories

- OVSM : Observatoire volcanologique et sismologique de la Martinique
Volcanological and Seismological Observatory of Martinique | Anne-Marie LEJEUNE
- OVSG : Observatoire volcanologique et sismologique de la Guadeloupe
Volcanological and Seismological Observatory of Guadeloupe | Roberto MORETTI
- OVPF : Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise
Volcanological Observatory of Piton de la Fournaise | Aline PELTIER
- Observatoires magnétiques **national magnetic observatory** | 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

Thèmes de recherche / Research themes

- Intérieurs de la Terre et des planètes **Earth and planetary interiors** | Cinzia FARNETANI et Nobuaki FUJI
- Risques naturels **Natural hazards** | Nathalie FEUILLET et Frédéric GIRAULT
- Système Terre **Earth system science** | Julien BOUCHEZ et Stéphane JACQUEMOUD
- Origines **Origins** | Cécile FERRARI et Frédéric MOYNIER

Équipes de recherche / Research teams

- Biogéochimie environnementale **Environmental biogeochemistry** | Rémi LOSNO
- Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale
Cosmochemistry, astrophysics et 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** | Pierre CARTIGNY
- Géomagnétisme **Geomagnetism** | Marianne GREFF
- Géomatériaux **Geomaterials** | Daniel NEUVILLE
- Géomicrobiologie **Geomicrobiology** | Alexandre GELABERT
- Géosciences marines **Marine geosciences** | Javier ESCARTIN
- Géodésie **Geodesy** | Isabelle PANET
- Paléomagnétisme **Paleomagnetism** | Frédéric FLUTEAU
- Physique des sites naturels **Physics of natural sites** | Frédéric PERRIER
- Planétologie et sciences spatiales **Planetary and space sciences** | Philippe LOGNONNÉ
- Sismologie **Seismology** | Eléonore STUTZMANN
- Systèmes volcaniques **Volcanic systems** | Jean-Christophe KOMOROWSKI
- Tectonique et mécanique de la lithosphère **Lithosphere tectonics and mechanics** | Yann KLINGER



© IPGP

Effectifs Staff

L'équipe de direction de l'IPGP se compose du directeur de l'établissement (Marc Chaussidon), du directeur général des services (Antoine Charlot), du directeur adjoint chargé de la recherche et du spatial (Gauthier Hulot), de la directrice adjointe chargée des observatoires (Anne Le Friant), du directeur adjoint chargé de l'enseignement (François Métivier), du directeur adjoint chargé des relations industrielles (Marc Benedetti) et du directeur adjoint chargé des relations internationales (Jean-Paul Montagner).

Le dispositif de pilotage de l'IPGP s'appuie notamment sur trois instances : un conseil d'administration qui est garant de la politique générale et de la stratégie de l'établissement et vote le budget, un conseil scientifique, qui pilote la politique de recherche et un conseil pédagogique, qui pilote la politique de formation. On compte également trois autres instances : le comité technique, la commission paritaire d'établissement et le comité d'hygiène, sécurité et conditions de travail.

The IPGP's management team includes its director (Marc Chaussidon), the general director of services (Antoine Charlot), the deputy director for research and space activities (Gauthier Hulot), the deputy director for observatories (Anne Le Friant), the deputy director for teaching (François Métivier), the deputy director for industrial relations (Marc Benedetti) and the deputy director for international relations (Jean-Paul Montagner).

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

510

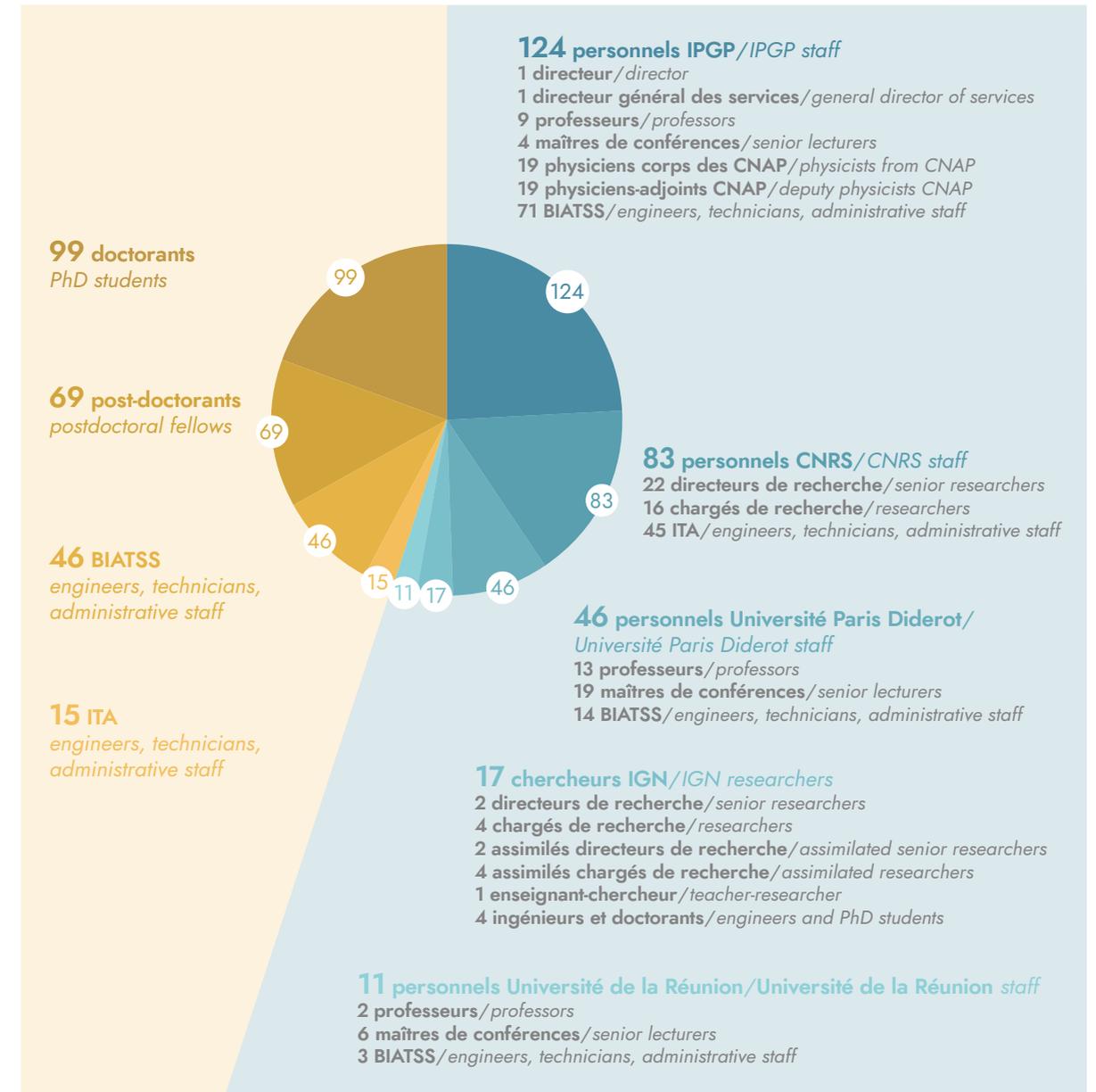
personnes en 2018 / people in 2018

229

non permanents / non-permanent staff

281

permanents / permanent staff



99 doctorants dont 35% d'étrangers / PhD students whose 35% foreigners

69 post-doctorants dont 31% d'étrangers / postdoctoral fellows whose 31% foreigners

67 chercheurs et professeurs invités / visiting researchers and professors

Vie de la recherche

Research life

2018 fut une nouvelle fois une année riche en lancements de projets scientifiques, de contrats de recherche et de signatures d'accords-cadres avec des partenaires majeurs.

- Nikolai Shapiro de l'équipe de sismologie a reçu une ERC Advanced Grant pour son projet SeisMaze, qui porte sur l'analyse massive des tremors sismiques, des signaux faibles mais de longue durée, pour développer des méthodes associant analyses et modélisations statistiques. Ce projet permettra d'étudier des processus de déformation lente, une signature de l'accumulation de l'énergie dans les systèmes géologiques actifs qui peut être relâchée lors des grands séismes et éruptions volcaniques.
- L'IPGP est l'institution coordinatrice de l'ETN (European Training Network) SaltGiant, supervisé par Giovanni Aloisi appartenant aux équipes de géomicrobiologie et de géochimie des isotopes stables. C'est un réseau interdisciplinaire de spécialistes en sciences naturelles et sociales qui se consacrent à la compréhension de la formation de l'un des plus grands gisements de sel sur Terre, celui du bassin méditerranéen, et de ses implications pour la vie microbienne sous-marine, l'évaluation des risques dans l'industrie pétrolière, la géo-économie de la région méditerranéenne et l'histoire de l'océanographie.
- Frédéric Moynier de l'équipe CAGE accueille Elishevah Van Kooten, dans le cadre d'une bourse Marie Sklodowska-Curie Individual Fellowship, pour le projet Complementarity. Celui-ci propose de tester la complémentarité chimique et isotopique entre la matrice et des météorites primitives, les chondres, permettant ainsi de mieux comprendre l'origine du système

2018 was yet another year rich in launches of scientific projects, research contracts and framework agreements signed with major partners.

- Nikolai Shapiro of the seismology team received an ERC Advanced Grant for his SeisMaze project, which focuses on the massive analysis of seismic tremors, weak but long-lasting signals, in order to develop methods combining analysis and statistical modelling. This project will study slow deformation processes, a signature of the accumulation of energy in active geological systems that can be released during major earthquakes and volcanic eruptions.
- The IPGP is the coordinating institution of the SaltGiant ETN (European Training Network), supervised by Giovanni Aloisi, a member of the Geomicrobiology and Stable isotopes geochemistry teams. This is an interdisciplinary network of natural and social scientists dedicated to understanding the formation of one of the largest salt deposits on Earth, the Mediterranean Basin, and its implications for underwater microbial life, risk assessment in the oil industry, the geo-economics of the Mediterranean region and the history of oceanography.



- Frédéric Moynier of the CAGE team welcomes Elishevah Van Kooten for the Complementarity project as part of a Marie Sklodowska-Curie Individual Fellowship. This project aims to test the chemical and isotopic complementarity between matrix and primitive meteorites, the chondrules, thus allowing a better understand-



Michèle Rousseau, PDG du BRGM et Marc Chaussidon, directeur de l'IPGP, ont signé le 18 janvier 2019 un premier accord-cadre entre les deux organismes.
Michèle Rousseau, CEO of BRGM, and Marc Chaussidon, Director of the IPGP, signed a first framework agreement between the two organizations on 18 January 2019. © IPGP

solaire, notamment en créant un pont avec les simulations astrophysiques qui traitent de la formation des planètes et les contraintes physico-chimiques sur l'origine des chondres.

- Deux projets européens ont été lancés : PIONEERS (Planetary Instruments based on Optical technologies for an iNnovative European Exploration Using Rotational Seismology) porté par Sébastien de Raucourt de l'équipe de planétologie et sciences spatiales, dans le cadre de l'appel à projet SPACE 2018 et CHEESE (Centre of Excellence for Exascale in Solid Earth), porté par Jean-Pierre Vilotte de l'équipe de sismologie, dans le cadre de l'appel à projet INFRAEDI 2018.



ding of the origin of the solar system, in particular by creating a bridge with astrophysical simulations that deal with the formation of planets and the physico-chemical constraints on the origin of chondrules.

- Two European projects have been launched: PIONEERS (Planetary Instruments based on Optical technologies for an iNnovative European Exploration Using Rotational Seismology) led by Sébastien de Raucourt of the Planetology and Space Science team, as part of the SPACE 2018 call for projects, and CHEESE (Centre of Excellence for Exascale in Solid Earth) led by Jean-Pierre Vilotte of the Seismology team, as part of the INFRAEDI 2018 call for projects.
- Three framework agreements have been signed with major partners: CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) and the Université de La Réunion, making it possible to coordinate scientific missions and complementary elements, particularly in observation, but also in research and technological development.

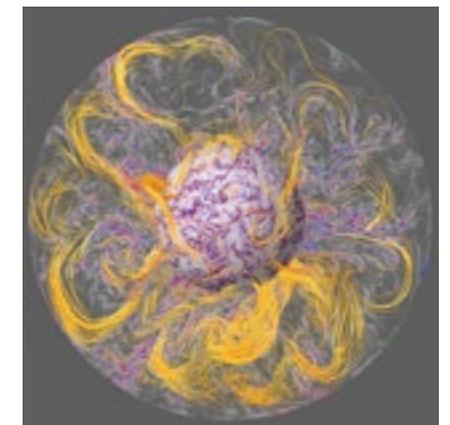
8 financements ANR obtenus / 8 ANR funding obtained

- **V-CARE** - Sensibilisation précoce aux éruptions volcaniques : développement, test et études de l'impact psychosociologique de nouveaux indicateurs en vue d'une meilleure gestion des crises volcaniques. Coordination IPGP, porté par Georges Boudon de l'équipe de systèmes volcaniques
- **RIDGEFACTORY SLOW** - Interaction fluide-roche en contexte d'exhumation du manteau aux dorsales lentes. Étude d'un cas extrême peu magmatique. Coordination IPGP, porté par Mathilde Cannat de l'équipe de géosciences marines
- **SIGMAG** - Signature des magnétites produites par les bactéries magnétotactiques : perspectives chimiques et isotopiques. Coordination IPGP, porté par Vincent Busigny de l'équipe de géochimie des isotopes stables
- **BIGDAD** - Comportement de verres industriels au cours de leur dissolution aqueuse. Coordination CEA, porté à l'IPGP par Daniel Neuville de l'équipe de géomatériaux
- **LISZT** - Carbonatation et ressources dans les listvenites de la zone de transition manteau ophiolitique/slab : apport des forages OmanDP et des expériences en laboratoire. Coordination CNRS, porté à l'IPGP par Isabelle Martinez de l'équipe de géochimie des isotopes stables
- **DISRUPT** - Déformation et rupture de surface sismiques : observations et modèles. Coordination IPGP, porté par Yann Klinger de l'équipe de tectonique et mécanique de la lithosphère
- **MAMBA** - Formation de minéraux dans les biofilms bactériens. Coordination IPGP, porté par Alexandre Gélabert de l'équipe de géomicrobiologie
- **SLOWDEF** - Aléas sismiques dans les orogènes à déformation lente. Programme « Jeunes Chercheuses Jeunes Chercheurs », porté par Martine Simoes de l'équipe de tectonique et mécanique de la lithosphère
- **V-CARE** - Early awareness of volcanic eruptions: development, testing and studies of the psychosocial impact of new indicators for better management of volcanic crises. Coordinated by the IPGP, led by Georges Boudon of the Volcanic systems team
- **RIDGEFACTORY SLOW** - Fluid-rock interaction in the context of mantle exhumation at slow-spreading ridges. Study of an extreme case with little magma. Coordinated by the IPGP, led by Mathilde Cannat of the Marine geosciences team
- **SIGMAG** - Signature of magnetites produced by magnetotactic bacteria: chemical and isotopic perspectives. Coordinated by the IPGP, led by Vincent Busigny of the Stable isotopes geochemistry team
- **BIGDAD** - Behaviour of industrial glasses during their aqueous dissolution. Coordinated by the CEA, led at the IPGP by Daniel Neuville of the Geomaterials team
- **LISZT** - Carbonation and resources in the listvenites of the ophiolitic mantle/slab transition zone: contribution of OmanDP drilling and laboratory experiments. Coordinated by the CNRS, led at the IPGP by Isabelle Martinez of the Stable isotopes geochemistry team
- **DISRUPT** - Seismic surface deformation and failure: observations and models. IPGP coordination, led by Yann Klinger of the Lithosphere tectonics and mechanics team
- **MAMBA** - Mineral formation in bacterial biofilms. Coordinated by the IPGP, led by Alexandre Gélabert of the Geomicrobiology team
- **SLOWDEF** - Seismic hazards in slow-moving orogens. "Young Researchers" programme, led by Martine Simoes of the Lithosphere tectonics and mechanics team

- Trois accords-cadres ont été signés avec des partenaires d'envergure : le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) et l'Université de la Réunion, permettant d'articuler les missions et complémentarités scientifiques en particulier dans le domaine de l'observation, mais aussi de la recherche et du développement technologique.
- Cinq lauréats de l'appel Make Our planet Great Again ont été accueillis à l'IPGP, dont le chercheur de haut niveau Louis A. Derry, professeur à l'université de Cornell, qui a rejoint l'équipe Géochimie des enveloppes externes pour cinq ans. Les quatre autres lauréats sont des doctorants et un étudiant en Master : Ssu-Ting Lai (équipe de sismologie), Abigail Lly Metcalfe (équipe de systèmes volcaniques), Alida Perez-Fodich (équipe de géochimie des enveloppes externes) et Mochammad-Husni Rizal (Master).
- Five winners of the Make Our planet Great Again call were welcomed to the IPGP, including senior researcher Louis A. Derry, a Professor at Cornell University who has joined the Geochemistry of external envelopes team for five years. The other four winners are doctoral students and a Master's student: Ssu-Ting Lai (seismology team), Abigail Lly Metcalfe (volcanic systems team), Alida Perez-Fodich (external envelope geochemistry team) and Mochammad-Husni Rizal (Master's).
- Julien Aubert, from the Geological fluid dynamics team, received a scientific grant from the Simone and Cino Del Duca Foundation of the Institut de France in late 2017, on the proposal of the Académie des sciences, for his work on computer modelling and understanding the geomagnetic tremors that affect the Earth's magnetic field.
- A multi-year contract with the Ministry of Ecological and Solidarity Transition was signed to finance an action programme for earthquake, volcano and gravitational mass movement risks.



- Julien Aubert, de l'équipe de dynamique des fluides géologiques, a reçu fin 2017 une subvention scientifique de la Fondation Simone et Cino Del Duca de l'Institut de France, sur proposition de l'Académie des sciences, pour ses travaux de modélisation informatique et de compréhension des secousses géomagnétiques que connaît le champ magnétique de la Terre.
- Un contrat pluriannuel avec le Ministère de la Transition écologique et solidaire a été signé en vue de financer un programme d'actions pour l'aléa sismique, volcanique et mouvements gravitaires.



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

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

© Aubert et al./IPGP/CNRS Photothèque



Prix et distinctions

Awards and honours



Manon Bickert

Géosciences marines/*Marine geosciences*

Prix récompensant une présentation remarquable de l'AGU

AGU Outstanding Presentation Award Winner



Julien Bouchez

Géochimie des enveloppes externes/*External envelopes geochemistry*

Prix Ebelmen de l'IAGC

IAGC Ebelmen Award



Marina Corradini

Sismologie/*Seismology*

Prix récompensant une présentation remarquable de l'AGU

AGU Outstanding Presentation Award Winner



Sébastien de Raucourt

Planétologie et sciences spatiales/*Planetary and space sciences*

Médaille de cristal du CNRS

CNRS Crystal Medal



Jérôme Gaillardet

Géochimie des enveloppes externes/*External envelopes geochemistry*

Médaille d'argent du CNRS

CNRS Silver Medal



Jérôme Gaillardet

Géochimie des enveloppes externes/*External envelopes geochemistry*

"Fellow" de la Geochemical Society/EAG

Geochemical Society/EAG Fellow



Maylis Landeau

Dynamique des fluides géologiques/*Geological fluid dynamics*

Prix Doornbos Memorial du SEDI

SEDI Doornbos Memorial Prize



Sylvie Larousse

Paléomagnétisme et géomicrobiologie

Paleomagnetism and geomicrobiology

Palmes académiques

Academics Palms Award



Philippe Lognonné

Planétologie et sciences spatiales/*Planetary and space sciences*

"Fellow" de l'American Geophysical Union

American Geophysical Union Fellow



Xavier Mangenot

Géochimie des isotopes stables/*Stable isotopes geochemistry*

Prix de thèse Van Straelen de la Société Géologique de France

Van Straelen Thesis Prize from the Société Géologique de France



Marina Rosas-Carbajal

Systèmes volcaniques/*Volcanic systems*

Lauréate Post-doc Axa Research Fund

Axa Research Fund Post-Doc Winner



Nikolai Shapiro

Sismologie/*Seismology*

"Fellow" de l'American Geophysical Union

American Geophysical Union Fellow



Vincent Busigny

Géochimie des isotopes stables/*Stable isotopes geochemistry*

Membre junior de l'Institut Universitaire de France

Institut Universitaire de France Junior Fellow



Marc Chaussidon

Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale

Cosmochemistry, astrophysics et experimental geophysics

"Fellow" de l'American Geophysical Union

American Geophysical Union Fellow



Catherine Chauvel

Géochimie des enveloppes externes/*External envelopes geochemistry*

"Fellow" de la Geochemical Society / EAG

Geochemical Society / EAG Fellow



Nouveaux chercheurs et enseignants-chercheurs

New researchers and teachers-researchers



Taichi Kawamura

Planétologie et sciences spatiales
Planetary and space sciences

Taichi obtient son doctorat en sciences de la Terre et des planètes des universités de Tokyo et Paris Diderot en 2012. De novembre 2012 à octobre 2016, il travaille en tant que chercheur postdoctoral à l'IPGP dans l'équipe SEIS de la mission InSight de la NASA sur la qualification du sismomètre et la préparation du prétraitement des données sismiques de la mission. A partir de novembre 2016, il est chercheur à l'Observatoire national d'astronomie du Japon pour l'équipe Ladar Altimeter de la mission Hayabusa 2 de la JAXA. Taichi étudie la sismologie des planètes et des satellites afin d'explorer leur structure interne.

Taichi received his PhD in Earth & Planetary Science from the University of Tokyo and the Université Paris Diderot in 2012. From November 2012 to October 2016, he was a post-doctoral researcher in the IPGP who worked for SEIS team of NASA InSight mission. There, he worked for the qualification of the seismometer and preparation of preprocessing of the seismic data of the mission. From November 2016, he was a project scientist of National Astronomical Observatory of Japan for Ladar Altimeter team of JAXA Hayabusa 2 mission. He has been working on seismology on planets and satellites to explore their internal structure.



Maylis Landeau

Dynamique des fluides géologiques
Geological fluid dynamics

Après une licence à l'ENS de Lyon en sciences de la Terre et un master en mécanique des fluides à l'UPMC et à l'École Polytechnique, Maylis réalise une thèse en géophysique à l'IPGP. En 2013, elle rejoint l'Université Johns Hopkins aux États-Unis en tant que chercheuse postdoctorale. En 2016, elle obtient une bourse Marie Curie à l'Université de Cambridge en Angleterre où elle reste jusqu'en 2018. Maylis étudie la formation et la dynamique de l'intérieur de la Terre en combinant expériences de laboratoire, simulations numériques et théorie afin de répondre à des questions telles que « Comment le noyau et le manteau terrestres se sont-ils formés il y a 4.5 milliards d'années ? » ou encore « En quoi cela a-t-il déterminé la composition et la dynamique de la Terre actuelle ? ».

After receiving a bachelor's degree in Earth Sciences from the ENS of Lyon and a master's degree in Fluid Mechanics from the UPMC and the École Polytechnique, Maylis completed a thesis in geophysics at the IPGP. In 2013, she joined Johns Hopkins University in the United States as a postdoctoral fellow. In 2016, she obtained a Marie Curie Fellowship at the University of Cambridge in England where she remained until 2018. Maylis studies the formation and dynamics of the Earth's interior by combining laboratory experiments, digital simulations and theory to answer questions such as "How did the Earth's core and mantle form 4.5 billion years ago?" and "How did this determine the composition and dynamics of the Earth today?".

Éric D. van Hullebusch

Biogéochimie environnementale Environmental biogeochemistry

Eric obtient son doctorat en chimie aquatique et microbiologie de l'université de Limoges en 2002. De novembre 2002 à octobre 2004, il est titulaire d'une bourse postdoctorale Marie Curie à la Wageningen University & Research (Pays-Bas) où ses recherches portent sur l'optimisation des réacteurs anaérobies à boues granulaires en étudiant la spéciation, la bio-disponibilité et les stratégies de dosage des métaux traces. En 2005, il est nommé maître de conférences en biogéochimie des écosystèmes aménagés à l'Université Paris Est, où il obtient en 2012 son HDR en sciences de l'environnement. De septembre 2016 à août 2018, il travaille à l'IHE Delft Institute for Water Education (Pays-Bas) en tant que professeur en sciences et technologies environnementales et responsable de la chaire Prévention de la pollution et récupération des ressources. En septembre 2018, il rejoint l'IPGP en tant que professeur titulaire en biogéochimie des métaux traces.



Eric received his PhD (Aquatic Chemistry and Microbiology) from the Université de Limoges in 2002. From November 2002 to October 2004, he was a Marie Curie Postdoctoral fellow at the Wageningen University & Research (Netherlands) where his research focused on the optimization of anaerobic granular sludge reactors by studying the speciation, bioavailability and dosing strategies of trace metals. In 2005, he was appointed as associate professor in biogeochemistry of engineered ecosystems at the Université Paris Est, where he obtained in 2012 his Habilitation qualification in Environmental Sciences. From September 2016 to August 2018, he worked at IHE Delft Institute for Water Education (Netherlands) as chair professor in Environmental Science and Technology and head of the Pollution Prevention and Resource Recovery chair group. In September 2018, he joined the IPGP as full professor in Biogeochemistry of trace metals.

Céline Pisapia

Géomicrobiologie Geomicrobiology

A former student of the École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy (ENSG), Céline Pisapia studies, as part of her thesis at the Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), mineral/live interactions and traces of microbial activity on the mineral surface.



Ancienne élève de l'École nationale supérieure de géologie de Nancy (ENSG), Céline Pisapia étudie, au cours de sa thèse à l'Institut national polytechnique de Lorraine (INPL), les interactions minéral/vivant et les traces d'activité microbienne en surface

de minéraux. Après deux ans d'ATER à l'université Lyon 1 et une première expérience post-doctorale avec l'ANDRA, elle rejoint l'IPGP en 2012 où elle développe, en collaboration avec le Synchrotron SOLEIL, la caractérisation du carbone organique à échelle micrométrique dans les roches. A la rentrée 2018, elle intègre l'IPGP en tant que maîtresse de conférences de l'université Paris Diderot où elle poursuit ses activités de recherche sur l'étude de la biosphère profonde et la caractérisation des assemblages bio-organo-minéraux à microéchelle par des approches de microscopie corrélative.

After two years as a temporary lecturer and research assistant at the Université Lyon 1 and a first post-doctoral experience with the ANDRA, she joined the IPGP in 2012 where she is developing, in collaboration with the Synchrotron SOLEIL, the characterisation of organic carbon on a micrometric scale in rocks. At the beginning of the 2018 academic year, she joined the IPGP as a lecturer at the Université Paris Diderot, where she is continuing her research activities on the study of the deep biosphere and the characterisation of bio-organic-mineral microscale assemblies using correlative microscopy approaches.

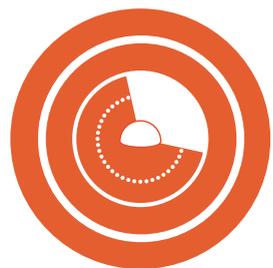


Jabrane Labidi

Géochimie des isotopes stables Stable isotopes geochemistry

Jabrane obtient son doctorat en géochimie à l'IPGP en décembre 2012. Il devient ensuite chercheur postdoctoral à l'université allemande de Tübingen en 2015 puis à l'UCLA (Université de Californie à Los Angeles) en 2017. Il a par ailleurs reçu la prestigieuse "fellowship" du Geophysical Laboratory (Carnegie Institution for Science, Washington DC) en 2013. Jabrane étudie les cycles géodynamiques des éléments volatils, avec un intérêt particulier pour le soufre et l'azote, deux éléments essentiels pour l'apparition et le développement de la vie sur Terre. Il étudie notamment la nature des composants subduits dans le manteau terrestre et l'empreinte isotopique laissée suite à la différenciation planétaire, ainsi que l'origine des anomalies isotopiques dans les météorites.

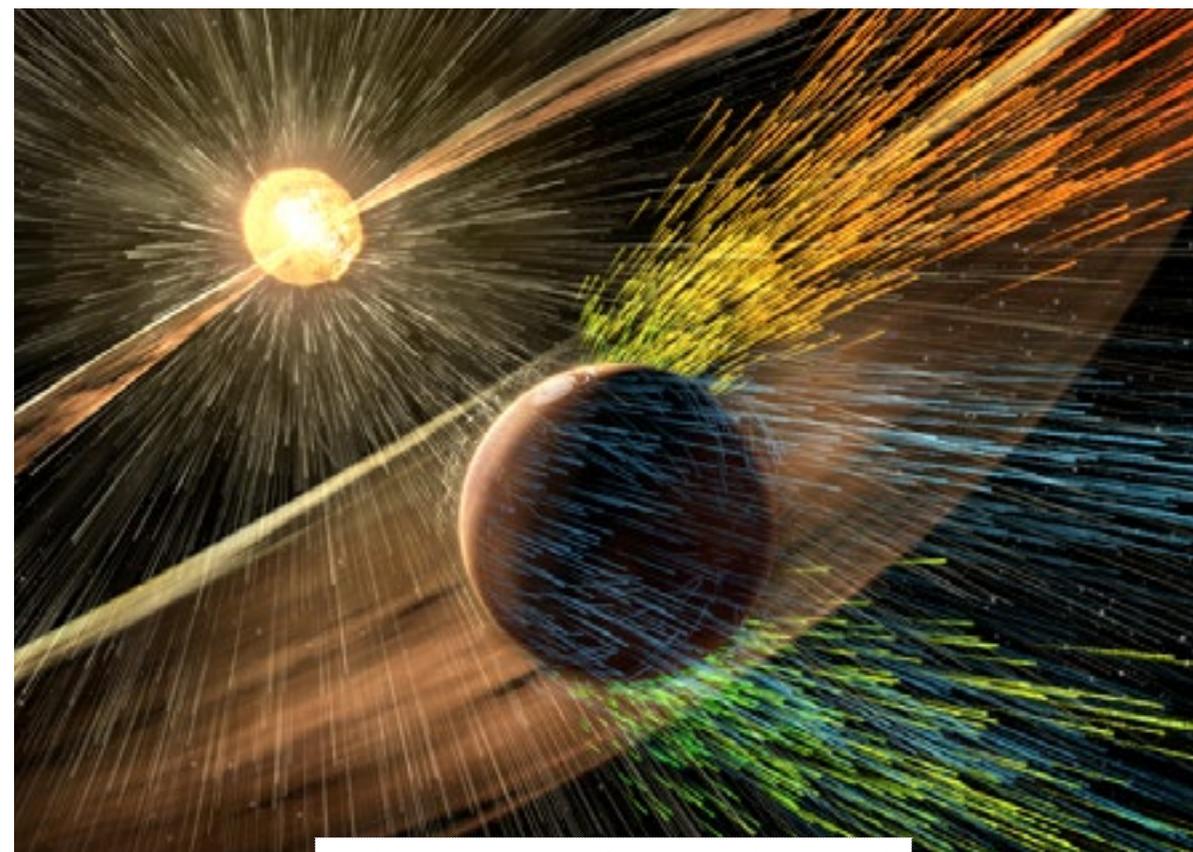
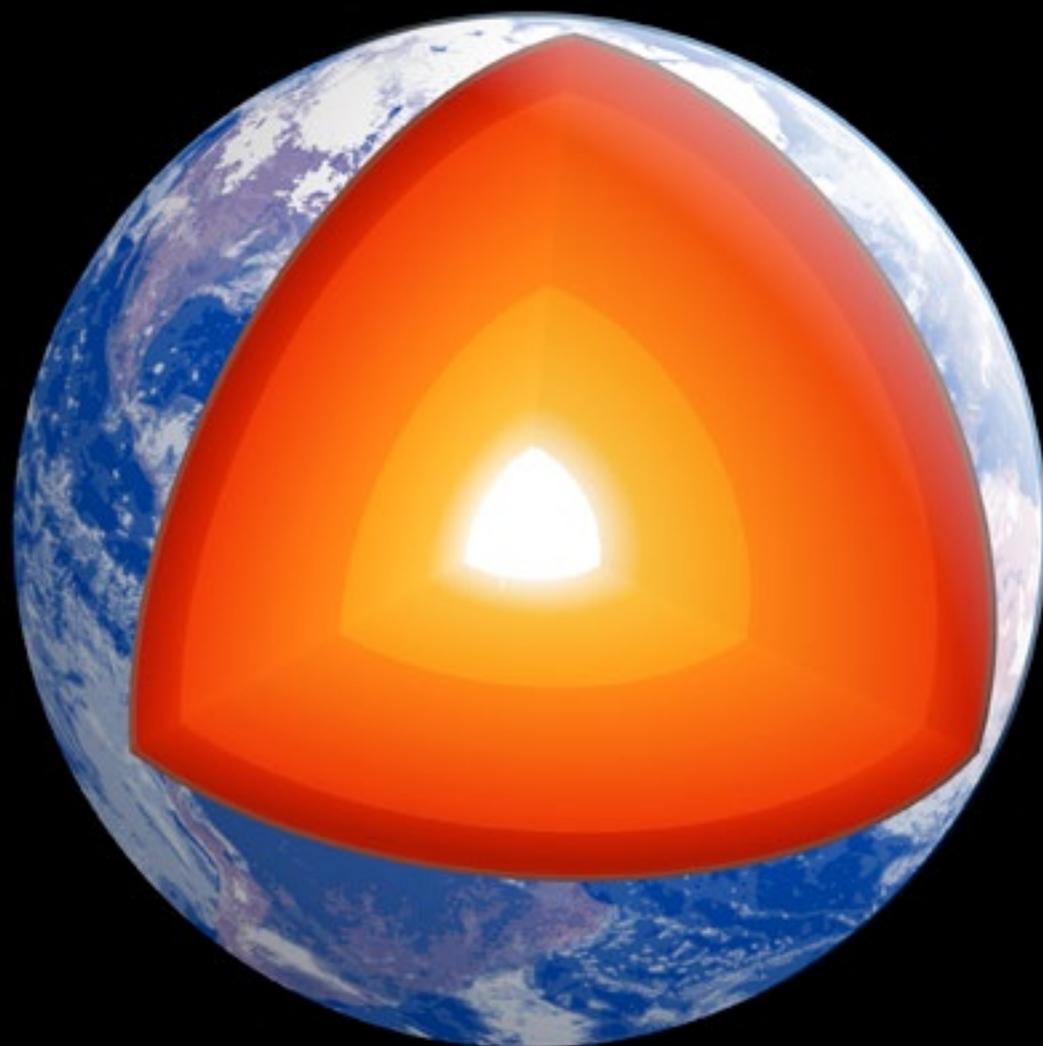
Jabrane received his PhD at the IPGP in December 2012. After that, he is the recipient of an ERC post-doctoral fellowship at the Tübingen University (Germany) in 2015, then a DCO-funded postdoctoral position at UCLA (University of California, Los Angeles) in 2017. He also received the prestigious postdoctoral fellowship at the Geophysical Laboratory (Carnegie Institution for Science, Washington DC) in 2013. Jabrane's research focuses on the study of the volatile dynamic and origin in planetary interiors and in the early solar system. This includes a specific interest in sulfur and nitrogen, two elements that are essential in our hydrosphere as drivers of Earth's habitability and life development. He studies the nature of subducted components in the Earth's mantle, the isotope fingerprint left on planetary mantles by core formation, and the evaluation of photochemistry signatures observed in meteorites.



INTÉRIEURS DE LA TERRE
ET DES PLANÈTES

Intérieurs de la Terre et des planètes

Earth and planetary interiors



Vue d'artiste d'une tempête solaire frappant Mars en éliminant les ions de son atmosphère supérieure. Artist's rendering of a solar storm hitting Mars and stripping ions from the planet's upper atmosphere. © NASA/GSFC

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

The physico-chemical processes occurring inside the Earth are responsible for many observable phenomena on its surface, such as telluric and volcanic activity or the existence of the magnetic field. The internal dynamics of a planet determines its evolution over geological time and its understanding requires multidisciplinary research and the deployment of cutting-edge technological innovations. For example, a seismometer developed at the IPGP to equip the Insight probe now transmits seismic data from another planet: Mars.

#1 La répartition du magnésium entre le manteau et le noyau terrestres peut potentiellement alimenter une géodynamo primitive par convection solutale

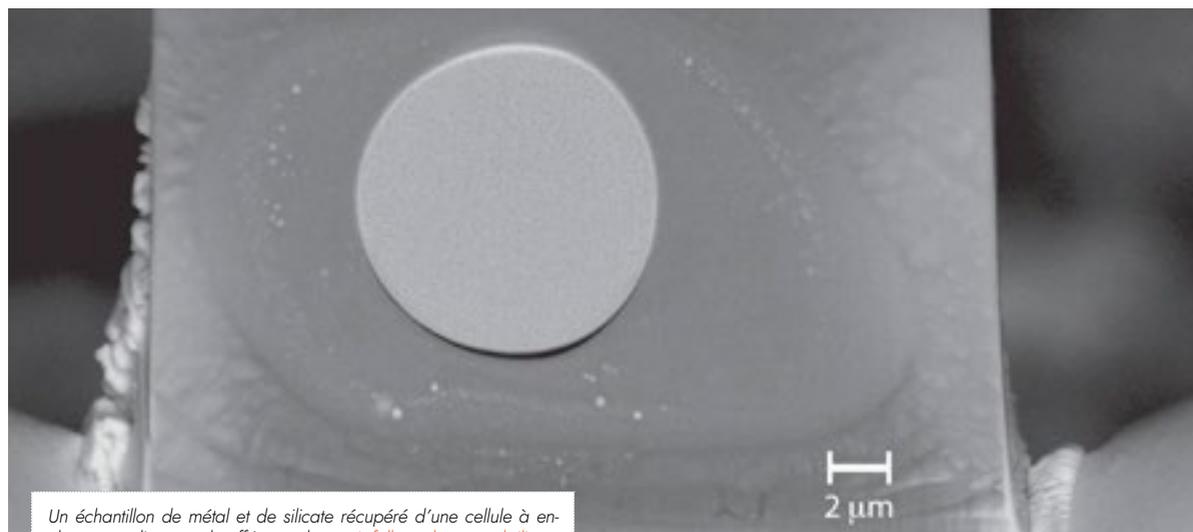
Magnesium partitioning between Earth's mantle and core and its potential to drive an early exsolution geodynamo

Quels sont les processus à l'origine de la géodynamo terrestre, source actuelle de notre champ magnétique ? Il semblerait que la croissance de la graine au centre de la Terre en soit le moteur actuel, l'exsolution d'éléments légers incompatibles dans le fer solide entraînant une convection solutale, responsable du champ magnétique dit "moderne". Mais comment expliquer l'existence d'un champ magnétique remontant à plus de 3,5 milliards d'années alors que la graine du noyau terrestre n'existait pas encore ? J. Badro et ses collègues apportent un élément de réponse à ce mystère par le biais d'expériences ardues de partage entre le noyau et le manteau, en cellule à enclumes en diamant (34 < P < 138 GPa ; 3500 < T < 5450 K). Ils montrent que l'oxyde de magnésium, MgO, qui peut être dissout en grandes quantités dans le noyau lors de sa formation, précipiterait vers le manteau lors de son refroidissement. Cette exsolution produit une flottabilité compositionnelle (de l'ordre de 10⁴ à 10⁵ kg/s) capable de produire une dynamo primitive au moins aussi intense que la dynamo actuelle, et ce jusqu'à l'apparition de la graine au centre de la Terre.

Which processes power the geodynamo? Since the formation of the inner core the main process is compositional buoyancy due to inner core growth, but how to explain the existence of a magnetic field as early as 3.45 Gyr ago, when the inner core did not exist? Badro et al. address these questions using challenging experiments in the laser-heated diamond anvil cell (34 < P < 138 GPa; 3500 < T < 5450 K) and show that magnesium oxide MgO, dissolved in the core at high initial temperatures, will precipitate out during subsequent core cooling. The key finding is that exsolution induces a compositional buoyancy (of order 10⁴ - 10⁵ kg/s) able to power an early geodynamo. Interestingly, the magnetic field in Earth's distant past could have been as intense as the present-day field.



J. Badro, J. Aubert, K. Hirose, R. Nomura, I. Blanchard, S. Borensztajn & J. Siebert, "Magnesium partitioning between Earth's mantle and core and its potential to drive an early exsolution geodynamo", *Geophysical Research Letters*, 45, doi: 10.1029/2018GL080405



Un échantillon de métal et de silicate récupéré d'une cellule à enclumes en diamant chauffée par laser. A fully molten metal-silicate sample recovered from the laser-heated diamond-anvil cell. © IPGP

#2 Grandes dérives du pôle : un indicateur clé de la configuration des plaques et de la convection mantellique pendant le Néoproterozoïque

True polar wander: a key indicator for plate configuration and mantle convection during the late neoproterozoic

La période de l'Ediacarien s'étend de 635 Myr (fin du Cryogénien) à 541 Myr (début du Cambrien) et marque la fin du Protérozoïque et le début du Phanérozoïque. Cette période est très importante car elle est associée à divers bouleversements paléoenvironnementaux, parmi lesquels l'explosion de la vie (faune d'Ediacara). Les observations paléomagnétiques indiquent des dérives très importantes du pôle magnétique pendant cette période (dérive apparente des pôles ou DAP) pouvant être interprétées soit comme un épisode particulier de génération du champ magnétique terrestre, soit comme une période de dérive exceptionnellement rapide des continents (True Polar Wander ou TPW).

Afin de comprendre et séparer les processus susceptibles de provoquer la forte DAP à ces périodes, les chercheurs de l'IPGP et de l'Université d'Oslo ont utilisé un modèle de dynamique du manteau capable de restituer la position des continents (par exemple Laurentia, Baltica, Gondwana, Australie-Antarctique). Les auteurs montrent que la réactivation des zones de subduction entourant les continents peut produire des épisodes de TPW très rapides (quelques dizaines de cm/an). Il est intéressant de noter que les variations du taux de subduction (de faible pendant le Cryogénien à élevé pendant l'Ediacarien) peuvent également affecter l'activité magmatique et le flux de CO₂ dans l'atmosphère, avec des conséquences importantes pour les glaciations à l'échelle mondiale.

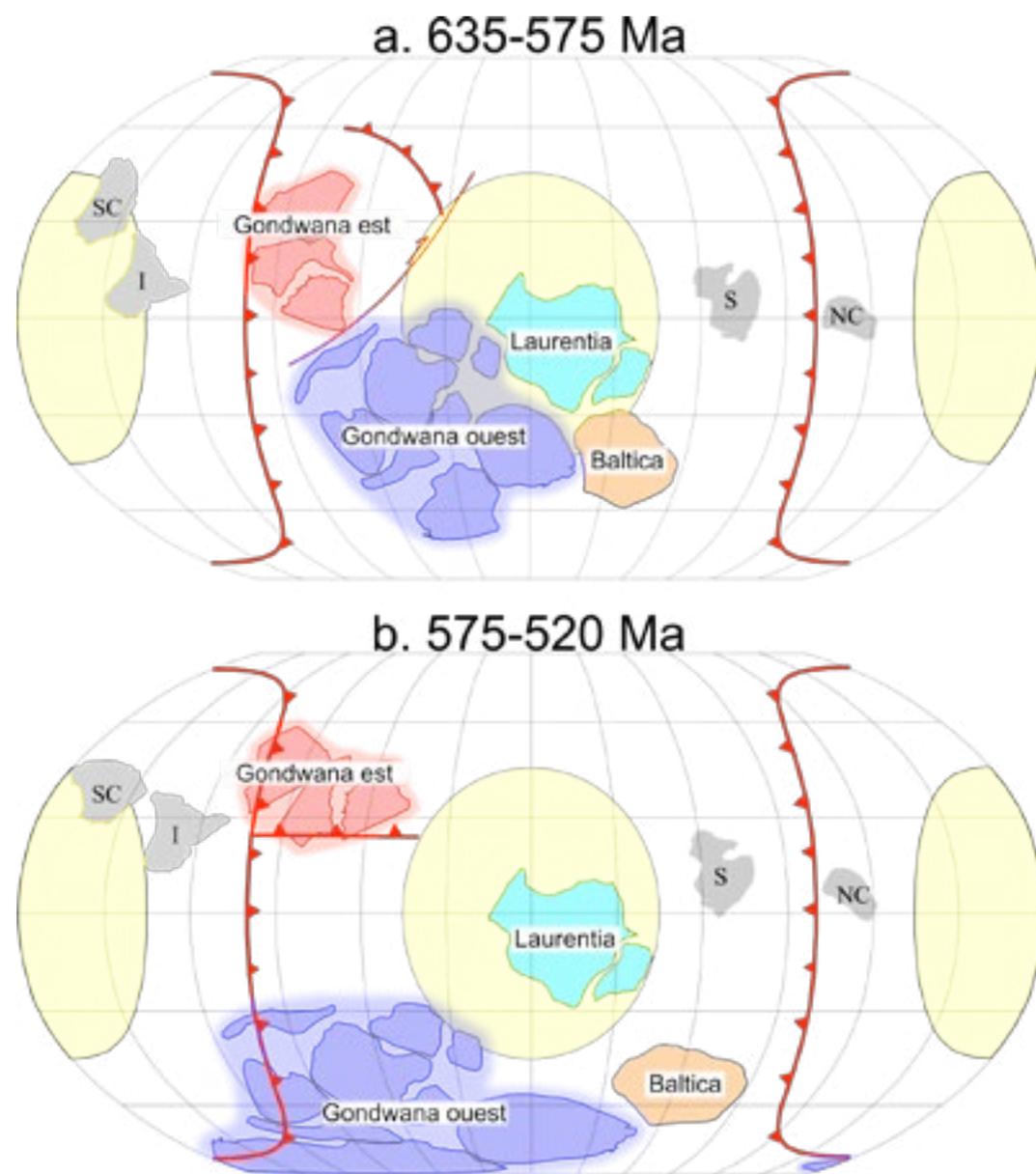
The Ediacaran Period, which marks the end of the Proterozoic Eon and the beginning of the Phanerozoic Eon, lasted from 635 Myr ago (end of the Cryogenian) to 541 Myr ago (beginning of the Cambrian). During the Ediacaran, a period known for the explosion of life (i.e., the Ediacaran fauna), paleomagnetic observations indicate large motions of the apparent polar wander paths (APWP).

In order to understand the processes that might cause APWP, researchers from the IPGP and the University of Oslo use a mantle dynamic model able to include the paleoposition of continents (e.g., Laurentia, Baltica, Gondwana, Australia-Antarctica). The authors show that reactivation of subduction zones surrounding the continents can produce episodes of rapid True Polar Wander (a few tens of cm/yr). Interestingly, variations in the rate of subduction (from low during the Cryogen to high during the Ediacaran) can also affect the magmatic activity and the flux of CO₂ into the atmosphere, with important implications for global-scale glaciations.



B. Robert, M. Greff-Lefftz & J. Besse, "True polar wander: a key indicator for plate configuration and mantle convection during the late Neoproterozoic", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19, 3478-3495, doi: 10.1029/2018GC007490

#3 Chenal sublithosphérique dans l'océan Atlantique équatorial engendré par une fusion partielle riche en eau Water-rich sublithospheric melt channel in the equatorial Atlantic Ocean



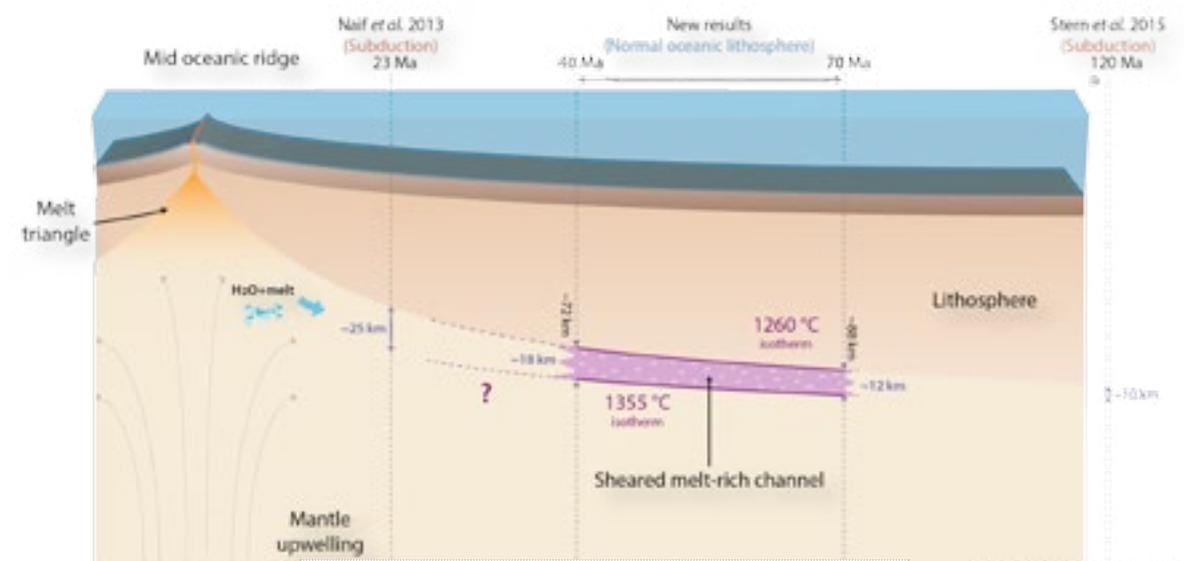
Reconstructions paléogéographiques dans un repère lié au manteau construites dans cette étude. La position des zones de subduction (rouge) et des courants chauds ascendants situés à la base du manteau et projetés en surface (jaune) ont permis de calculer l'évolution de la répartition des masses dans le manteau.
Paleo-geographic reconstructions in a mantle-related landmark constructed in this study. The position of the subduction zones (red) and the rising warm currents at the base of the mantle and projected to the surface (yellow) made it possible to calculate the evolution of the mass distribution in the mantle. © IPGP

La frontière entre la lithosphère et l'asthénosphère (LAB) sépare la plaque lithosphérique rigide du manteau en convection. Comment expliquer le changement de propriétés rhéologiques à cette frontière ? Des chercheurs de l'IPGP explorent la lithosphère âgée de 40 à 70 Myr dans l'océan Atlantique en utilisant des techniques de sismique réflexion ultra-profonde. L'échantillonnage fin, typique de l'exploration pétrolière et gazière, permet de détecter deux réflecteurs profonds délimitant une zone à faible vitesse sismique. Cette zone, aussi nommée chenal sublithosphérique, a une épaisseur qui diminue (de 18 à 12 km) avec l'âge de la lithosphère, tandis que sa profondeur augmente (72-88 km). La température estimée varie entre 1260 °C et 1355 °C, respectivement en haut et en bas du chenal. Cette étude suggère en outre que la fusion partielle, facilitée par un flux d'eau provenant de la dorsale, est le principal mécanisme responsable du chenal à faibles vitesses sismiques.

The lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) separates the rigid lithospheric plate from the underlying convecting mantle. How to explain the change in rheological properties occurring at this boundary? Researchers from the IPGP explore the 40 to 70 Myr old lithosphere in the Atlantic Ocean using ultra-deep seismic reflection techniques. The fine sampling, typical of oil and gas exploration, enables them to detect two deep reflectors which bound a low seismic velocity channel. The thickness of the sublithospheric channel (18-12 km) decreases with age, whereas its depth (72-88 km) increases with age. The estimated temperature across the channel varies between 1260 °C and 1355 °C, respectively at the top and bottom of the channel. This study further suggests that partial melting, facilitated by a water flux from the ridge, is the main mechanism responsible for the seismically observed low-velocity channel.



F. Mehouachi & S.C. Singh, "Water-rich sublithospheric melt channel in the equatorial Atlantic Ocean", *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/s41561-017-0034-z



La frontière entre la lithosphère et l'asthénosphère (LAB) selon l'âge.
The lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) as a function of age. © IPGP

Mehouachi & Singh (2018)



RISQUES NATURELS

Risques naturels

Natural hazards



Dégâts suite au tsunami de 2004 à Sumatra.
Damages after the 2004 tsunami in Sumatra. © IPGP

La maîtrise des risques naturels tels que les éruptions volcaniques, les tremblements de terre, les tsunamis, les glissements de terrain ou encore les orages magnétiques, est un enjeu majeur pour le développement durable des sociétés humaines. Les risques naturels sont le résultat de processus géologiques se produisant sur des échelles de temps et d'espace particulièrement variées et qui concernent la quasi-totalité des spécialités des sciences de la Terre. Leur étude à l'IPGP combine approches de terrain, en observatoires, depuis l'espace ou lors de campagnes en mer, mesures et études d'échantillons en laboratoire, ainsi que modélisation théorique, numérique ou expérimentale des processus.

Controlling natural hazards such as volcanic eruptions, earthquakes, tsunamis, landslides and magnetic storms is a major challenge for the sustainable development of human societies. Natural hazards are the result of geological processes occurring on particularly varied time and space scales and affecting almost all Earth science specialties. Their study at the IPGP combines field approaches, in observatories, from space or during sea campaigns, laboratory measurements and sample studies, as well as theoretical, numerical or experimental process modelling.

#1 Connaître la magnitude des séismes en observant l'atmosphère Determining the magnitude of earthquakes by observing the atmosphere

Une équipe de chercheurs de l'IPGP introduit une nouvelle magnitude, M_i (magnitude ionosphérique), capable de transformer les oscillations des couches ionisées de la haute atmosphère détectées par des radars du CEA et de l'ONERA en informations sismiques.

À la suite d'un séisme, l'atmosphère vibre avec la Terre. En connaissant les propriétés physiques de cette vibration, il est possible de la reconvertir en mouvement du sol et de transformer ainsi les radars en "sismomètres atmosphériques", capables à l'avenir de couvrir des zones océaniques inaccessibles aux sismomètres classiques et d'améliorer notre connaissance de la Terre.

Introduite en 1935 par Charles Richter afin d'uniformiser les mesures de 7 sismomètres du laboratoire de sismologie de Pasadena dans le sud de la Californie, la magnitude M_L n'avait pour but, à l'époque, que de mesurer et d'estimer localement l'intensité des événements sismiques californiens. La magnitude locale M_L a été étendue l'année suivante, en 1936, à l'ensemble de la surface de la Terre par Beno Gutenberg et Charles Richter, en introduisant la magnitude M_S , une magnitude estimée en mesurant les ondes de surface (S pour « surface wave ») générées par un séisme et détectables même à grande distance de l'épicentre.

L'estimation de la magnitude d'un séisme a beaucoup évolué au cours de l'histoire de la sismologie mais a toujours été limitée à l'utilisation d'observations sismiques faites à la surface de la Terre. Avec la magnitude ionosphérique M_i , on franchit cette limite et on élargit le champ de vision de la sismologie sur Terre, mais aussi pour d'autres planètes en y ajoutant l'atmosphère. Observer l'atmosphère de Vénus pourrait ainsi donner des informations sur la sismicité de la planète, dont les conditions à la surface sont trop hostiles pour un sismomètre.

A team of IPGP researchers is introducing a new magnitude, M_i (ionospheric magnitude), capable of transforming the oscillations of the ionised layers of the upper atmosphere detected by the CEA and ONERA radars into seismic information.

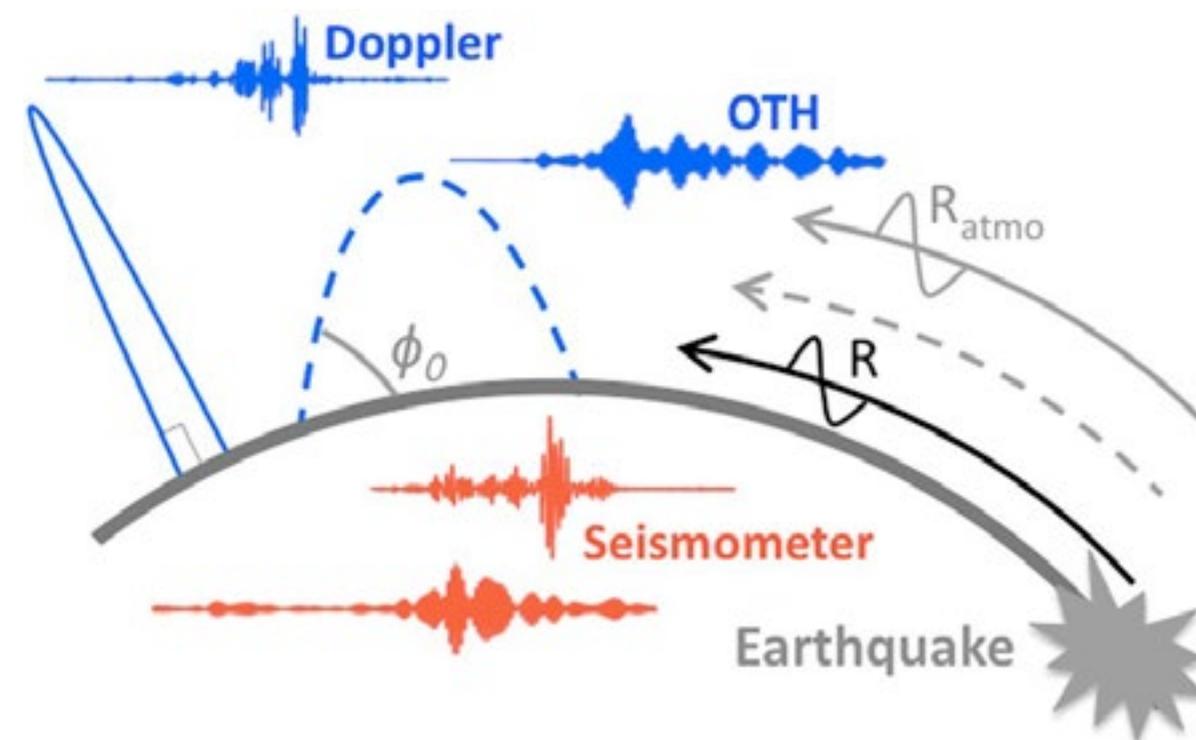
Following an earthquake, the atmosphere vibrates with the Earth. If we know the physical properties of this vibration, it can be converted back into ground motion and radars can thus be transformed into 'atmospheric seismometers', capable in the future of covering ocean areas inaccessible to conventional seismometers and improving our knowledge of the Earth.

Introduced in 1935 by Charles Richter to standardise the measurements of 7 seismometers at the Pasadena seismology laboratory in Southern California, the magnitude M_L was intended, at the time, only to measure and estimate locally the intensity of Californian seismic events. The following year, in 1936, the local magnitude M_L was extended to the entire surface of the Earth by Beno Gutenberg and Charles Richter, introducing the magnitude M_S , a magnitude estimated by measuring surface waves (S) generated by an earthquake and detectable even at great distance from the epicentre.

The estimation of the magnitude of an earthquake has evolved considerably over the history of seismology but has always been limited to the use of seismic observations made at the Earth's surface. With the ionospheric magnitude M_i , this limit is surpassed and the scope of seismology is broadened both for Earth as well as for other planets by adding the atmosphere. Observing the atmosphere of Venus could thus provide information on the seismicity of the planet, whose surface conditions are too hostile for a seismometer.

Aujourd'hui l'IPGP explore et propose, avec le soutien du CNES et de la NASA, des idées de satellites pour sonder l'atmosphère de la Terre et de Vénus, multiplier les observables sismiques et améliorer l'alerte tsunami.

Today, the IPGP is exploring and proposing, with the support of CNES and NASA, ideas for satellite to probe the Earth's and Venus' atmosphere, increase seismic observables and improve tsunami warning.



Propagation des ondes de Rayleigh (R , noir) et de sa signature dans l'atmosphère (R_{atmo} , gris) suite à un tremblement de terre. Le schéma met en évidence la géométrie d'observation du sondeur Doppler (ligne pleine bleue, angle d'émission proche de 90°) et du radar OTH (ligne pointillée bleue, angle d'émission ϕ_0 , entre 10° et 60°). Les courbes montrent des mesures réelles de deux événements différents (Colombie, 7.2, 2004-11-15; Philippines, 6.7, 06-02-2012) observés dans l'ionosphère (bleu), respectivement par des sondeurs Doppler et OTH, et au sol (rouge), par sismomètre. Le sondeur Doppler et le sismomètre respectif (en haut) sont filtrés à environ 10-20 mHz, l'OTH et le sismomètre respectif (en bas) sont filtrés à environ 40-50 mHz. Le choix de la bande filtrée n'est qu'indicatif pour souligner que la signature ionosphérique de l'onde de Rayleigh est cohérente avec la fréquence Brunt-Väisälä (environ 3,5 mHz) à 60 mHz.

Propagation of Rayleigh waves (R , black) and its signature in the atmosphere (R_{atmo} , gray) following an Earthquake. The cartoon highlights the observation geometry of the Doppler sounder (blue full-line, emission angle close to 90°) and OTH radar (blue dotted-line, emission angle ϕ_0 , between 10° and 60°). The curves show real measurements of two different events (Colombia, 7.2, 2004-11-15; Philippines, 6.7, 2012-02-06) observed in the ionosphere (blue), by Doppler sounders and OTH respectively, and at the ground (red), by seismometer. The Doppler sounder and the respective seismometer (top) are filtered at around 10-20 mHz, the OTH and the respective seismometer (bottom) are filtered at around 40-50 mHz. The choice of the filtered band is only indicative to highlight that the ionospheric signature of Rayleigh wave is coherent from the Brunt-Väisälä frequency (around 3.5 mHz) and until 60 mHz. © IPGP



G. Occhipinti, F. Aden-Antoniow, A. Bablet, T. Farges, J.-P. Molinie, "Surface waves magnitude estimation from ionospheric signature of Rayleigh waves measured by Doppler sounder and OTH radar", *Scientific Report*, doi: 10.1038/s41598-018-19305-1

#2

De nouveaux signaux précédant les ondes sismiques : comment les perturbations précoces de gravité permettent de quantifier la magnitude des forts séismes

New signals preceding seismic waves: how early gravity disturbances can quantify the magnitude of strong earthquakes

Les tremblements de terre changent brutalement l'équilibre des forces au niveau de la rupture, générant des ondes sismiques qui se propagent dans la croûte et le manteau terrestre à des vitesses comprises entre 3 et 10 km/sec. Ces ondes potentiellement dévastatrices sont les principales manifestations des séismes et permettent depuis les débuts de la sismologie de les localiser et de les quantifier. Cependant, dans une perspective de détermination rapide de l'ampleur d'un séisme particulièrement important, en vue d'anticiper l'arrivée d'un tsunami potentiel, les sismologues se heurtent au délai incompressible associé au temps de propagation des ondes avant leur arrivée aux sismomètres.

Par ailleurs, ces ondes sismiques sont à l'origine d'un autre phénomène physique : dès leur génération par le séisme - puis au cours de leur propagation - elles causent des dilatations et des compressions du milieu, dont l'effet cumulé perturbe faiblement, mais immédiatement (plus exactement à la vitesse de la lumière - 300 000 km/s), le champ de gravité de la Terre. Et bien que présent dans les équations théoriques complètes du mouvement sismique, ce signal précoce lié à la gravité n'a été que très récemment considéré. Dans une première analyse en 2016 (voir rapport annuel précédent), un tel signal a été détecté sur un gravimètre lors du séisme de Tohoku (Japon, 11 mars 2011, magnitude 9.1). Dans une étude suivante, des chercheurs de l'IPGP, de l'université Paris Diderot, du CNRS et du Caltech ont retravaillé sur ce même séisme en allant beaucoup plus loin dans l'observation et la compréhension du phénomène. Tout d'abord, le signal est observé sur une dizaine de sismomètres large-bande à des distances comprises entre 500 et 3000 km du séisme. Ce signal est mesuré de manière concordante, avec un haut rapport

Earthquakes abruptly change the balance of forces at the rupture, generating seismic waves that propagate in the Earth's crust and mantle at speeds between 3 and 10 km/sec. These potentially devastating waves are the main manifestations of earthquakes, which have been located and quantified by these since the beginnings of seismology. However, in scenarios where seismologists need to rapidly determine the magnitude of a particularly large earthquake in order to anticipate the arrival of a potential tsunami, they are confronted with an irreducible time lag due to the propagation time of waves before they arrive at seismometers.

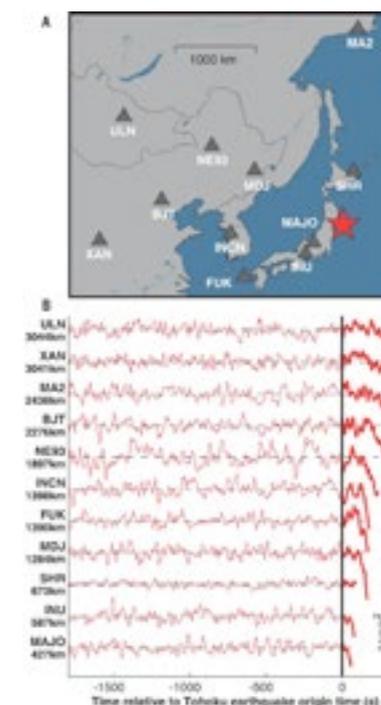
Moreover, these seismic waves are at the origin of another physical phenomenon: as soon as they are generated by the earthquake, and then during their propagation, they cause dilations and compressions of the environment, whose cumulative effect slightly - but immediately (more precisely at the speed of light, 300 000 km/s) - disrupts Earth's gravity field. And although present in the complete theoretical equations of seismic motion, this early signal related to gravity has only very recently been considered. In a first analysis in 2016 (see previous annual report), such a signal was detected on a gravimeter during the Tohoku earthquake (Japan, 11 March 2011, magnitude 9.1). In a subsequent study, researchers from the IPGP, Université Paris Diderot, CNRS and Caltech again worked on the same earthquake, going much further in the observation and understanding of the phenomenon. First, the signal was observed on about ten broadband seismometers at distances between 500 and 3000 km from the earthquake. This signal was measured in a consistent manner, with a high signal-to-noise ratio. The quality of the signals then made it possible to look at their precise origin. The research team thus understood

signal/bruit. La qualité des signaux a ensuite permis de se pencher sur leur origine précise. L'équipe de chercheurs a ainsi compris que la forme des signaux est due à la combinaison de deux effets : un effet direct dû à la perturbation de gravité qui déplace la masse du sismomètre et un effet induit dû aux ondes sismiques générées par les perturbations de gravité au voisinage du sismomètre. En effet, de manière analogue à un séisme, mais à une échelle beaucoup plus petite, un changement de gravité perturbe l'équilibre des forces dans le milieu terrestre, ce qui est à l'origine d'ondes sismiques.

Observations des signaux pré-P sur des sismomètres à large bande. (A) Carte des stations sélectionnées situées dans un rayon hypocentral de 400 à 3000 km. L'étoile rouge montre l'épicentre du tremblement de terre de Tohoku. (B) Signaux d'accélération a_z dans la gamme de fréquences de 0,002 à 0,03 Hz, représentés dans une fenêtre temporelle commençant 30 minutes avant l'heure d'origine du séisme et se terminant à l'heure d'arrivée de l'onde P à chaque station (l'échelle de 1 nm/s^2 est indiquée à droite). Les noms des stations et leurs distances hypocentriques en kilomètres (suivant la surface de la Terre) sont indiqués à gauche de chaque signal. Dans la fenêtre temporelle entre l'heure d'origine et l'heure d'arrivée de l'onde P, les signaux sont dessinés avec une courbe rouge épaisse.

Observations of the pre-P signals on broadband seismometers. (A) Map of the selected stations located in the 400- to 3000-km hypocentral distance range. The red star shows the Tohoku earthquake epicenter. (B) a_z acceleration signals in the 0.002 to 0.03 Hz frequency range, represented in a time window starting 30 min before the earthquake origin time and terminating at the P-wave arrival time at each station (1 nm/s^2 scale is shown to the right). Names of the stations and their hypocentral distances in kilometers (following Earth's surface) are shown to the left of each signal. In the time window between origin time and P-wave arrival time, signals are drawn with a thick red curve. © IPGP

that the signal shape is due to a combination of two effects: a direct effect due to the gravity disturbance that displaces the mass of the seismometer, and an induced effect due to seismic waves generated by gravity disturbances in the vicinity of the seismometer. Indeed, similar to an earthquake, but on a much smaller scale, a change in gravity disrupts the balance of forces in the Earth's environment, causing seismic waves.

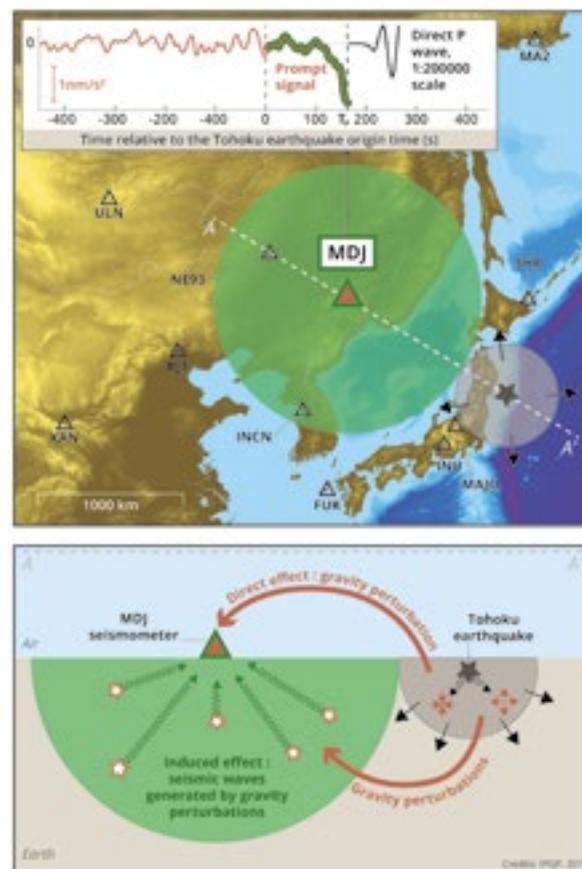


La prise en compte de ces deux effets permet de bien expliquer les données et montre que le signal précoce lié à la gravité est très sensible à la magnitude du séisme. Dans le cas de celui de Tohoku, sa magnitude supérieure à 9 aurait ainsi pu être déterminée dans les minutes suivant son occurrence, bien avant ce qui peut être fait par les méthodes conventionnelles. Le défi est maintenant de pouvoir utiliser cette information pour des séismes de magnitude nettement plus faible. En effet, pour un séisme de magnitude 8, le bruit sismique de la Terre rend déjà les instruments actuels aveugles au faible signal lié aux perturbations de gravité. Plusieurs technologies, dont certaines inspirées des instruments développés pour la détection des ondes gravitationnelles, sont envisagées pour faire un nouveau pas en avant dans la détection de ces précieux signaux.

Taking these two effects into account helps to explain the data and shows that the early signal related to gravity is very sensitive to the magnitude of the earthquake. In the case of Tohoku, its magnitude greater than 9 could have thus been determined within minutes of its occurrence, well before what can be achieved by conventional methods. The challenge now is to be able to use this information for earthquakes of much lower magnitude. For an earthquake of magnitude 8, the seismic noise of the Earth already makes current instruments blind to the weak signal associated with gravity disturbances. Several technologies, some of which are based on instruments developed for the detection of gravitational waves, are being considered to take a further step forward in the detection of these valuable signals.

La carte indique la localisation des sismomètres (triangles) ayant détecté un signal précoce à la suite du séisme de Tohoku (étoile) du 11 mars 2011 (Japon, Mw 9.1). On se focalise ici sur une station au Nord-Est de la Chine (MDJ), située à 1280 km du séisme. A ces distances, les ondes sismiques directes arrivent environ 165 s après le temps origine, comme indiqué dans l'encart. Cependant, bien que d'amplitude beaucoup plus faible, un signal clair est détecté par le sismomètre avant ces ondes directes. L'origine de ce signal se comprend en se plaçant à des temps compris entre le temps origine et celui de l'arrivée des ondes : par exemple, environ 55 s après le déclenchement du séisme, les ondes sismiques se sont propagées dans le volume indiqué en gris et sont sur le point d'atteindre la station MAJO. A l'intérieur de ce volume, les ondes causent des compressions et des dilatations du milieu, comme indiqué dans la coupe du bas. La contribution globale de toutes ces zones dont la masse change conduit à une modification immédiate de la gravité détectée par le sismomètre (effet direct). Le champ gravitationnel est également perturbé partout dans la Terre et chacune de ces perturbations est une force qui est à l'origine d'ondes sismiques secondaires (effet induit). Dans le volume à proximité du sismomètre (indiqué en vert), ce champ sismique secondaire arrive avant les ondes directes. Le sismomètre enregistre ainsi, avant les ondes sismiques directes, un signal élasto-gravitaire découlant des effets directs et induits des perturbations de gravité.

The map shows the location of the seismometers (triangles) that detected an early signal following the Tohoku (star) earthquake of 11 March 2011 (Japan, Mw 9.1). The focus here is on a station in Northeast China (MDJ), located 1280 km from the earthquake. At these distances, direct seismic waves arrive about 165 s after the origin time, as indicated in the sidebar. However, a clear signal is still detected by the seismometer before these direct waves, although of much smaller amplitude. The origin of this signal is understood by looking at times between the origin time and the arrival of the waves: for example, about 55 s after the earthquake was triggered, the seismic waves propagated in the volume indicated in grey and are about to reach the MAJO station. Within this volume, the waves cause compression and expansion of the medium, as indicated in the bottom section. The overall contribution of all these zones with changing mass results in an immediate modification of the gravity detected by the seismometer (direct effect). The gravitational field is also disturbed throughout the Earth and each of these disturbances is a force that causes secondary seismic waves (induced effect). In the volume near the seismometer (shown in green), this secondary seismic field arrives before the direct waves. The seismometer thus records, before direct seismic waves, an elasto-gravity signal resulting from the direct and induced effects of gravity disturbances. © IGP



M. Vallée, J. P. Ampuero, K. Juhel, P. Bernard, J.-P. Montagner & M. Barsuglia, "Observations and modeling of the elastogravity signals preceding direct seismic waves", *Science*, doi : 10.1126/science.aao0746

#3 Scénario de rupture pour le séisme de Kaikoura, (Mw 7.8, 2016), en Nouvelle Zélande

Rupture scenario for the Kaikoura earthquake, (Mw 7.8, 2016), New Zealand

En novembre 2016, la Nouvelle Zélande a été affectée par un séisme majeur de magnitude Mw 7.8. Il se caractérise par un nombre inhabituellement élevé de failles activées lors d'un même tremblement de terre, 15 au total, faisant probablement de lui le séisme avec la rupture de surface la plus complexe connue à ce jour. Un enjeu important dans l'étude de ces grands séismes est de comprendre comment

In November 2016, New Zealand was affected by a major earthquake of magnitude Mw 7.8. It is characterised by an unusually high number of faults activated during the same earthquake, 15 in total, which probably makes it the most complex surface rupture known to date. An important issue in the study of these large earthquakes is to understand how the rupture spread from one fault to another

la rupture s'est propagée d'une faille à l'autre et quels sont les paramètres qui contrôlent cette propagation. Dans le cas du séisme de Kaikoura, il s'agit notamment de déterminer comment la rupture s'est propagée et a rompu toute les failles formant le point triple entre les failles de Jordan, Kekerengu et Papatea. En combinant les observations de terrain avec la mesure de la déformation de surface par corrélation d'images optiques à très haute résolution, des chercheurs ont pu mettre en évidence un motif de déformation tout à fait particulier impliquant une part importante de déformation distribuée. En comparant la distribution spatiale et l'amplitude de cette déformation distribuée avec des modèles de la rupture incluant de l'endommagement dans le milieu, ils ont pu déterminer le cheminement le plus probable de la rupture au travers du point triple et ont pu montrer l'importance de la déformation distribuée dans le processus de rupture.

and what the parameters are that control this propagation. In the case of the Kaikoura earthquake, this includes determining how the rupture spread and ripped across all the faults forming the triple junction between the Jordan, Kekerengu and Papatea faults. By combining field observations with the measurement of surface deformation by correlating very high resolution optical images, researchers were able to identify a very particular pattern of deformation involving a large proportion of distributed deformation. By comparing the spatial distribution and amplitude of this distributed deformation with failure models including environmental damage, they were able to determine the most likely path of failure through the triple junction and could show the scope of the distributed deformation in the rupture process.



Carte des ruptures de surface associées au séisme de Kaikoura. Les labels 1 et 2 indiquent les différents scénarios possibles pour la propagation de la rupture. L'emprise des différentes images utilisées est aussi indiquée. Map of surface ruptures from the Kaikoura earthquake. Labels 1 and 2 indicate the different possible scenarios for the propagation of the rupture. The scope of the different images used is also indicated. © IGP

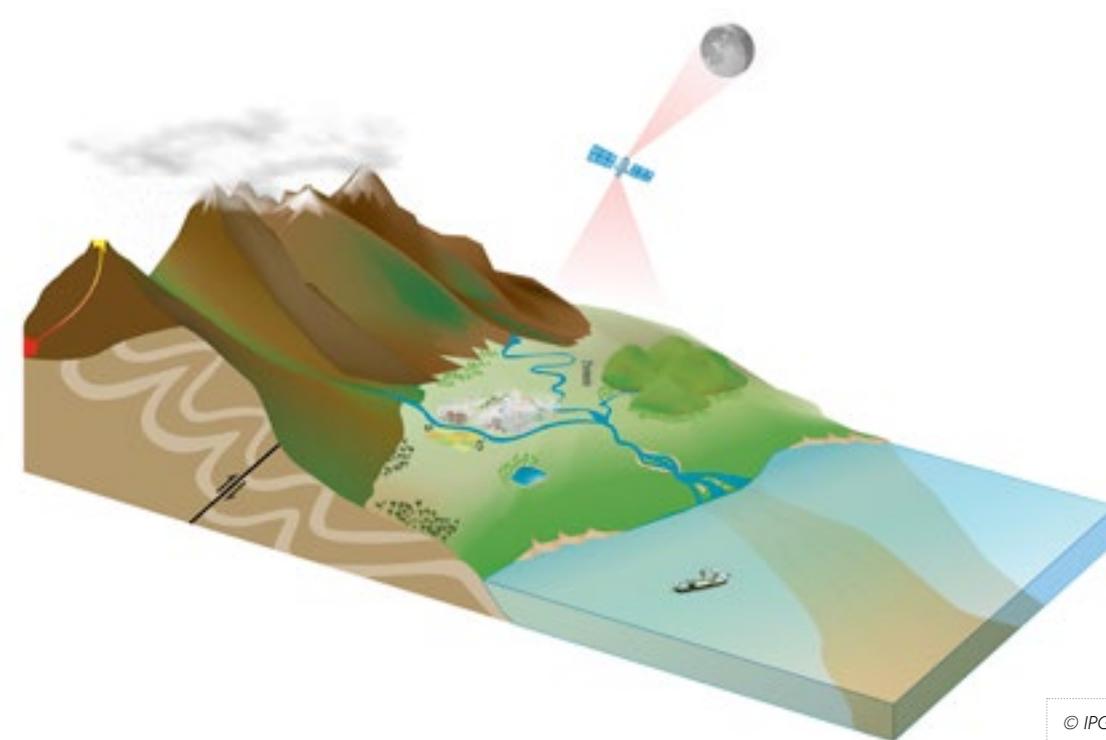
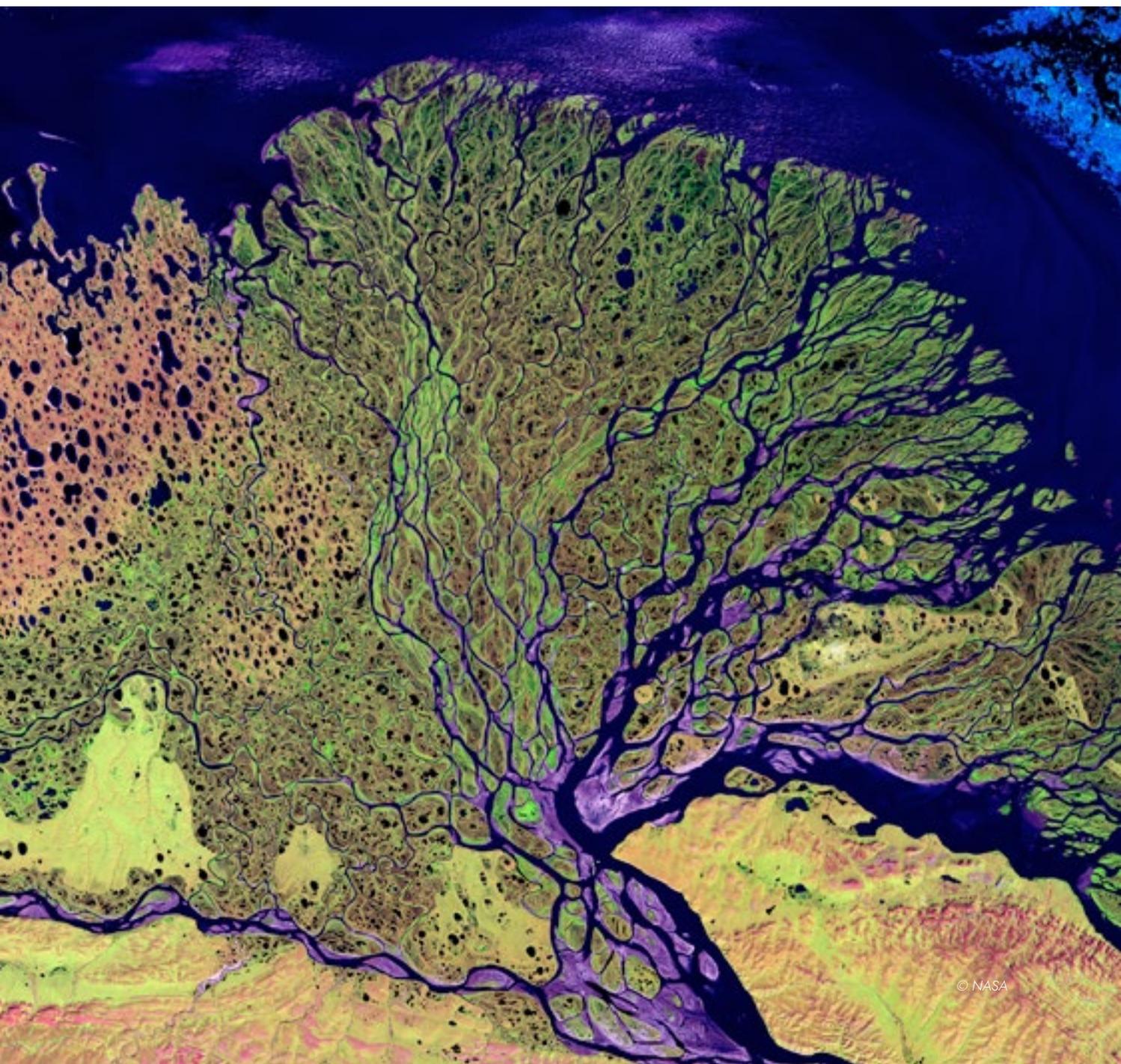


Y. Klinger, K. Okubo, A. Vallage, J. Champenois, A. Delorme, E. Rougier, et al., "Earthquake damage patterns resolve complex rupture processes", *Geophysical Research Letters*, 45, doi: 10.1029/2018GL078842



Système Terre

Earth system science



Le thème **Système Terre** s'intéresse aux interactions entre les enveloppes externes de notre planète (lithosphère, hydrosphère, biosphère et atmosphère). Les surfaces continentales et le fond des océans sont des milieux où les organismes vivants, l'air, le sol, l'eau et la roche interagissent de façon complexe. Théâtre de transformations chimiques, de réactions biologiques et d'échanges de flux d'énergie et de matière, ces milieux jouent un rôle environnemental majeur à la surface de la Terre. Ils incluent notamment la zone critique, couche la plus externe de notre planète qui s'étend de la base des aquifères au sommet de la couche limite atmosphérique. En concentrant la plupart des activités humaines, la zone critique est sujette à des changements rapides et profonds affectant les organismes vivants et leur environnement.

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

#1

Donner de la profondeur à la surface : un exercice dans la Gaia-graphie des zones critiques

Giving depth to the surface: an exercise in the Gaia-graphy of Critical Zones

Située à la limite supérieure de la Terre où les roches, les sols, l'eau, l'atmosphère et les êtres vivants interagissent, la zone critique est une des zones tampons de notre planète, une condition de son habitabilité, notamment pour les êtres humains qui y vivent, y puisent leurs ressources minérales, l'eau et les nutriments essentiels à l'agriculture. Cette couche est donc critique dans le contexte de l'Anthropocène car c'est celle sur laquelle les humains doivent veiller. Elle est le résultat de l'imbrication de nombreux réservoirs, reliés entre eux par de multiples flux et processus et elle est spatialement très hétérogène. La zone critique n'a pas de nature globale et ne correspond qu'à un trait de crayon à la surface de la planète dans les représentations galiléennes du monde, presque invisible par rapport aux couches plus épaisses que sont le noyau, le manteau ou la croûte terrestre. Les différents blocs diagrammes qui la représentent en coupe ne savent pas où s'arrêter vers le bas, restant ouverts sur l'infini de l'univers. Il en résulte un problème général de représentation de la zone critique, tant pour les scientifiques dont c'est l'objet d'étude que pour les acteurs du territoire, le grand public et les institutions politiques qui prennent des décisions susceptibles d'affecter son évolution.

Une étude menée par une architecte, un philosophe des sciences et un géochimiste, dans le cadre du programme « Politiques de la Terre à l'épreuve de l'Anthropocène », propose une nouvelle représentation de la zone critique. Obtenue via une « anamorphose » de la représentation classique du globe (c'est-à-dire une modification des distances entre objets), elle place les êtres humains et l'atmosphère au centre, entourés par les sols et l'hydrosphère, le manteau et le noyau étant repoussés aux confins de l'espace. Le Soleil, principale source d'énergie de la zone critique, est représenté comme alimentant les différentes couches de cette

As the top layer of the Earth where rocks, soils, water, the atmosphere and living beings interact, the Critical Zone is one of our planet buffer zones and a condition for its habitability, especially for the human beings who live there and draw mineral resources from it, water and nutrients essential to their agricultural systems. This zone is therefore critical in the context of the Anthropocene because it is the one that humans must care for. It is the result of the interfacing of many reservoirs, connected by multiple flows and processes, and it is spatially very heterogeneous. The Critical Zone is not global in nature; it represents merely a pencil line on the surface of the planet in Galilean representations of the Earth, almost invisible compared to thicker layers such as the core, the mantle and the crust. The different block models that represent it in cross-section do not know where to stop at the bottom, remaining open to the infinity of the universe. This results in a general problem representation of the Critical Zone, both for scientists who study it and for territorial bodies, the general public and the political institutions who make decisions that may affect its evolution.

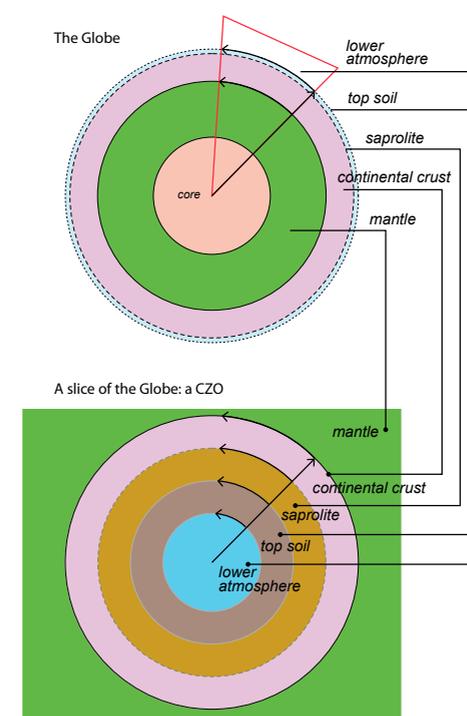
A study conducted by an architect, a philosopher of science and a geochemist, as part of the "Earth Policy in the Anthropocene" programme, proposes a new representation of the Critical Zone. Obtained through an "anamorphosis" of the classical representation of the globe (i.e., a modification of the distance between objects), it places human beings and the atmosphere in the centre, surrounded by the soils and the hydrosphere, with the mantle and the core being pushed to the limits of space. The Sun, the main energy source of the Critical Zone, is represented as powering the different layers of this representation, in a third dimension. The biogeochemical flows, which organise space and matter transfers between the different reservoirs, intersect the different layers with geometries that reflect the

représentation, selon une troisième dimension. Les flux biogéochimiques, qui organisent l'espace et les transferts de matières entre les différents réservoirs, recourent les différentes couches avec des géométries reflétant les propriétés de ces flux (telles que leur magnitude par exemple). Une « grammaire » de la représentation des cycles biogéochimiques à l'échelle d'un observatoire de la zone critique complète le tout.

Ce travail, qui aboutit à une adéquation entre objets et enjeux, montre bien le besoin de collaboration entre sciences naturelles et sciences humaines et sociales en vue de redéfinir une politique de la nature plus en phase avec les enjeux de l'humanité.

properties of these flows (such as their magnitude). A "grammar" of the representation of biogeochemical cycles at the scale of an observatory in the Critical Zone completes the study.

The study balances subjects and challenges, clearly showing the need of a collaboration between the natural sciences and the human and social sciences in order to redefine a nature policy that is more in line with the challenges humanity is faced with.



Nouvelle représentation conceptuelle de la zone critique. Les différentes composantes sont déployées en cercles concentriques autour d'un point de référence (qui peut être n'importe quel observatoire de la zone critique) dans un plan circulaire. Cette anamorphose place au centre les couches essentielles pour la vie sur Terre au lieu qu'elles soient écrasées comme dans la représentation classique. Les flèches indiquent la façon dont les différentes couches sont construites géométriquement.

New conceptual representation of the Critical Zone. The different components are deployed in nested circles around a reference point (that can be any specific CZO - Critical Zone Observatory) in a circular plane. This operation is an anamorphosis that positions the layers that are essential for life on Earth in the center instead of being squashed as in the classical representation. The arrows indicate the way the different layers are geometrically constructed. © IPGP



A. Arènes, B. Latour & J. Gaillardet, "Giving depth to the surface: An exercise in the Gaia-graphy of critical zones", *The Anthropocene Review*, 5(2), 120-135, doi: 10.1177/2053019618782257

#2

Répartition granulométrique uniforme dans la couche active d'une rivière en tresses peu profonde (rivière Urumqi en Chine) et implications pour la paléo-hydrologie

Uniform grain-size distribution in the active layer of a shallow braided river (the Urumqi River, China) and implications for paleo-hydrology

Au premier ordre, la taille des grains (granulométrie) des sédiments transportés par les rivières est contrôlée par la tectonique et les conditions climatiques à la surface des continents. Ces facteurs affectent en effet l'altération qui produit les particules sédimentaires, le flux d'eau qui les transporte et l'espace disponible qui les piège temporairement ou de façon permanente. La granulométrie des sédiments de rivières, des plus fins (argiles, silts et sables) aux plus grossiers (galets), offre un enregistrement quantitatif de la dynamique des environnements alluviaux et de leurs forçages tectoniques et climatiques passés. En théorie, il est donc possible "d'inverser" la taille des grains des archives sédimentaires pour remonter aux paléo-conditions de production, de transport et de dépôt des sédiments. Parmi les nombreuses études visant à reconstruire ces paléo-conditions, une catégorie d'entre elles se basent donc sur des analyses de tailles de grains réalisées à partir d'affleurements sédimentaires.

Jusqu'à présent, l'équivalence entre ces analyses granulométriques sur affleurements et celles réalisées sur le lit des rivières actuelles n'avait jamais été testée, ni démontrée. C'est maintenant chose faite dans le cas des rivières en tresses à graviers, grâce à une étude de terrain inédite réalisée dans la rivière Urumqi en Chine. Une équipe de chercheurs a comparé les distributions de tailles de sédiments prélevés dans une tranchée creusée dans le lit de la rivière et de grains prélevés sur les murs verticaux de la tranchée. Ils ont ainsi pu montrer que les distributions de tailles de grains des différents échantillons étaient similaires avec comme implication une uniformité des dépôts du lit de la rivière et des méthodes d'échantillonnage (d'ensemble ou sur affleurement artificiel) conduisant au même ré-

At first order, the grain size (or granulometry) of sediments transported by rivers is controlled by tectonics and climatic conditions on the surface of continents. These factors affect the alteration that produces sediment particles, the flow of water that transports them, and the available space that traps them temporarily or permanently. The granulometry of river sediments, from the finest grains (clay, silt and sand) up to the coarser (pebbles), provides a quantitative record of the dynamics of alluvial environments and their past tectonic and climatic forcings. In theory, it is therefore possible to extract from the grain size of sedimentary archives to go back to the paleo-conditions of sediment production, transport and deposit. Among the many studies aim at reconstructing these paleo-conditions, a whole subset is therefore based on grain size analyses carried out from sedimentary outcrops.

To date the equivalence between the granulometric analyses performed on outcrops and those carried out on the bed of modern rivers has never been tested or validated. It is now done in the case of gravel-bedded braided rivers, thanks to an unprecedented field study conducted in the Urumqi River in China. A research team compared the size distributions of sediments, taken in a trench dug in the river bed and grains sampled on the vertical walls of the trench. Thus they were able to show that the grain size distributions of the different samples were similar, implying that the deposits on the river bed were uniform and that sampling methods (overall or on artificial outcrops) led to the same result in terms of grain size.

This study therefore demonstrates for the first time that granulometric analyses on vertical outcrops are



Tranchée de 7,2 m de long et 1,2 m de large creusée dans les dépôts de la rivière Urumqi en Chine. 7.2-m long and 1.2-m wide trench dug into the sediment deposits of the Urumqi River in China. © IPGP

sultat en matière de granulométrie. Cette étude démontre donc pour la première fois que les analyses granulométriques sur affleurements verticaux sont pertinentes pour déterminer la taille des grains des paléo-rivières et au-delà, les paléo-conditions de production, de transport et de dépôts sédimentaires en contexte alluvial.

well suited for determining the grain size of paleochannels and beyond, the paleo-conditions of production, transport and sedimentary deposits in alluvial contexts.



L. Guerit, L. Barrier, Y. Liu, C. Narteau, E. Lajeunesse, E. Gayer & F. Métivier, "Uniform grain-size distribution in the active layer of a shallow, gravel-bedded, braided river (the Urumqi River, China) and implications for paleo-hydrology", *Earth Surf. Dynam.*, 6, 1011-1021, doi: 10.5194/esurf-6-1011-2018, 2018

#3 Stockage minéral du CO₂ dans les basaltes : quand les bactéries du sous-sol profond s'en mêlent

Mineral storage of CO₂ in basalts: when deep underground bacteria get involved

Les activités humaines conduisent à l'utilisation de combustibles fossiles et à l'accroissement de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère, causant le changement climatique actuel. Des solutions de géo-ingénierie visent à contrecarrer cette augmentation. Parmi celles-ci, le « stockage géologique minéral *in situ* » du CO₂ tire parti de la capacité naturelle des réactions d'altération chimique des roches à convertir l'acide carbonique en minéraux carbonatés, constituant ainsi un stockage pérenne de ce gaz à effet de serre. Les roches basaltiques étant très sensibles à ces réactions d'altération chimique, les coulées basaltiques d'îles volcaniques font l'objet de recherches actives dans l'optique d'établir des technologies fiables pour le stockage géologique du CO₂.

Les basaltes de basse température (< 120°C) sont aujourd'hui reconnus comme l'un des habitats microbiens les plus importants sur Terre. Or, les effets potentiels du métabolisme de ces communautés microbiennes sur les technologies de stockage géologique du CO₂ restent mal connus. Les auteurs de cette étude ont suivi, à partir de 2018, la réponse des communautés microbiennes de subsurface au cours d'injections de gaz acides (CO₂ ± H₂S) menées en Islande, sur le site pilote de la centrale géothermique d'Hellisheidi où deux injections ont été réalisées en 2012.

La réponse des écosystèmes microbiens profonds à l'injection de CO₂ dans l'eau souterraine est immédiate et très rapide (de l'ordre de quelques semaines). Les eaux acides résultant de l'injection conduisent à la dissolution de la roche basaltique, libérant des nutriments tels que le fer, nécessaire à la croissance microbienne et à l'assimilation du CO₂. Ce dernier a par conséquent été converti en biomasse plutôt qu'en carbonate, soit en une forme moins stable que celle escomptée initialement. L'état redox de l'eau souterraine et la disponibilité des nutriments ont aussi été modifiés par l'injection et sa réponse microbienne, avec pour

Human activities result in the burning of fossil fuels and in an increase in CO₂ concentration in the Earth's atmosphere, causing the current climate change. Geoengineering solutions aim to counteract this increase. Among these, "*in situ* mineral geological storage" of CO₂ takes advantage of the natural ability of chemical weathering reactions in rocks to convert carbonic acid into carbonate minerals, thus leading to a sustainable storage of this greenhouse gas. As basalt is very sensitive to these chemical weathering reactions, basalt flows on volcanic islands are the object of an active research to establish reliable technologies for the geological storage of CO₂.

Low-temperature basalts (< 120°C) are now recognised as one of the most important microbial habitats on Earth. However, the potential effects of the metabolism of these microbial communities on CO₂ geological storage technologies remain poorly understood. The authors of this study studied the response of subsurface microbial communities during acid gas injections (CO₂ ± H₂S) conducted in 2018 in Iceland, at the pilot site of the Hellisheidi geothermal power plant where two injections were carried out in 2012.

The response of deep microbial ecosystems to CO₂ injection into groundwater is immediate and very rapid (in the order of a few weeks). The acid water resulting from the injection led to the dissolution of the basalt rock, releasing nutrients such as iron, which is necessary for microbial growth and CO₂ assimilation. CO₂ was therefore converted to biomass rather than to carbonate, i.e., to a less stable form than initially expected. The redox state of groundwater and nutrient availability were also modified by the injection and its microbial response, resulting in a change in the reactivity of the basalt minerals and a potentially reduced efficiency of CO₂ storage by this technology.

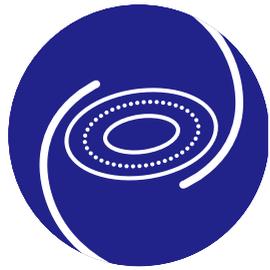
conséquence un changement dans la réactivité des minéraux du basalte et une efficacité potentiellement amoindrie du stockage du CO₂ par cette technologie.



Filtration des eaux souterraines au niveau de la tête d'un puits foré dans les basaltes pour collecter les micro-organismes constituant les écosystèmes profonds. Groundwater filtration at the wellhead drilled in the basalts to collect the microorganisms present in deep ecosystems.
© Bénédicte Ménez - IPGP

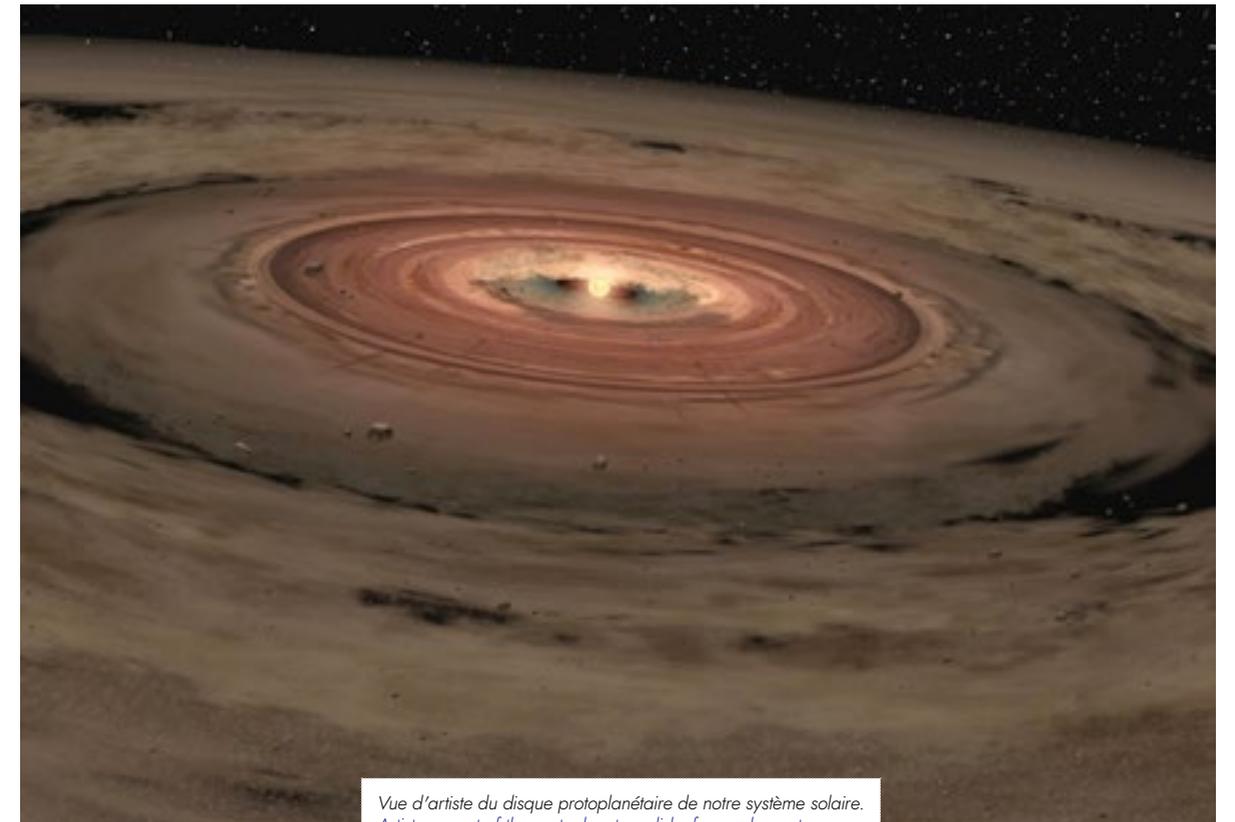
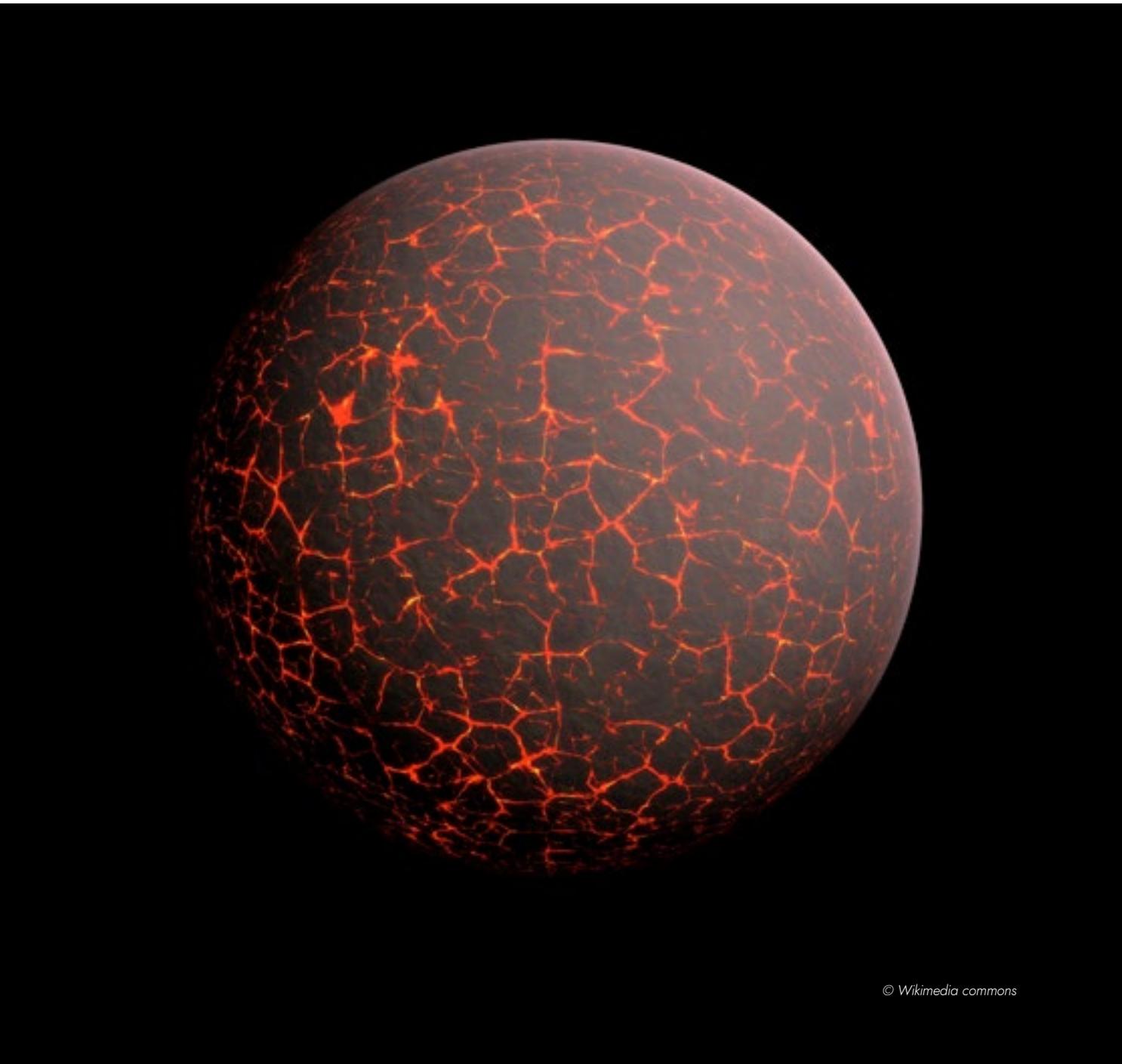


R. Trias, B. Ménez, P. le Campion, Y. Zivanovic, L. Recourt, A. Lecoeuvre, P. Schmitt-Kopplin, J. Uhl, S. R. Gislason, H. A. Alfreðsson, K. G. Mesfin, S. Ó. Snæbjörnsdóttir, E. S. Aradóttir, I. Gunnarsson, J. M. Matter, M. Stute, E. H. Oelkers & E. Gérard, "High reactivity of deep biota under anthropogenic CO₂ injection into basalt", *Nature Communications*, 8, Article 1063, doi: 10.1038/s41467-017-01288-8



ORIGINES

Origines Origins



*Vue d'artiste du disque protoplanétaire de notre système solaire.
Artist concept of the protoplanetary disk of our solar system.
© NASA/JPL-Caltech/T.Pyle (SSC)*

Les planètes du système solaire présentent des compositions et structures particulièrement variées. Les processus à l'origine de ces différences demeurent largement inconnus. Ils ont tout autant contrôlé la composition de la matière première à partir de laquelle la vie est apparue, que les conditions environnementales relatives au développement des premiers organismes vivants sur Terre, voire ailleurs dans le système solaire et même au-delà, sur des exoplanètes. L'IPGP est l'un des rares établissements où des scientifiques de multiples domaines de recherche peuvent travailler ensemble sur le décryptage des processus à l'origine du système solaire, de ses planètes et de son habitabilité.

Planets in the Solar System have variable compositions and structures. The processes at the origin of these differences remain largely unknown. They controlled the composition of the raw material from which life originated, as well as the environmental conditions pertaining to the development of the first living organisms on Earth, and perhaps elsewhere in the Solar System or on extrasolar planets. The IPGP is one of very few institutions where scientists from different fields can merge and work together towards deciphering the processes that shaped the Solar System, its planets and its habitability.

#1

De potentiels précurseurs des premières briques du vivant observés dans des roches océaniques profondes

Potential precursors to the first building blocks of life observed in deep-sea rocks

Le monde du vivant est notamment caractérisé par sa capacité d'autonomie et de reproduction, mais surtout par la grande complexité de ses structures organiques. Comprendre le passage d'un monde minéral à ces molécules organiques de plus en plus complexes et aptes à s'assembler pour créer les premières briques du vivant est donc primordial à la compréhension de l'apparition de la vie telle qu'on la connaît sur Terre.

Dans les années 50, l'expérience de laboratoire de deux chercheurs américains, Stanley Miller et Harold Urey, a montré que les conditions extrêmes qui régnaient sur la très jeune Terre auraient pu rendre possible la synthèse de telles molécules dans l'atmosphère primitive avant leur dissémination dans les océans peu profonds, avant même l'apparition de toutes formes de vie. Cependant, cette hypothèse dite de la soupe primitive n'a jamais pu être démontrée en milieu naturel et les conditions utilisées dans ces expériences ne reflétaient pas celles régnant probablement lorsque la vie est apparue sur Terre.

Une équipe de scientifiques européens a utilisé une approche de microscopie corrélative innovante, combinant plusieurs techniques d'imagerie de haute-résolution, sur des échantillons prélevés par forage à environ 175 m de profondeur dans la lithosphère océanique lors de l'Expédition 304 du programme international de forage océanique IODP. Grâce à cette méthode, les scientifiques ont pu observer des acides aminés, molécules complexes indispensables au vivant, synthétisés abiotiquement au cours de l'altération des roches océaniques profondes provenant de l'Atlantis Massif (dorsale médio-atlantique, 30°N).

C'est l'interaction entre l'eau de mer et les minéraux de ces roches issues du manteau terrestre, ainsi que la structure en feuillet de l'argile résultant de leur altération, qui ont sans doute apporté les conditions idéales pour la formation de ces constituants pri-

The living world is characterised by its capacity for autonomy and reproduction, and above all by the great complexity of its organic structures. Understanding the shift from a mineral world to these increasingly complex organic molecules, capable of creating the first building blocks of life, is therefore essential to understanding the emergence of life as we know it on Earth.

In the 1950s, a laboratory experiment by two American researchers, Stanley Miller and Harold Urey, showed that the extreme conditions prevailing on the very young Earth could have made it possible to synthesise such molecules in the primitive atmosphere before they spread to the shallow oceans, even before any life forms had appeared. However, this "primordial soup" hypothesis could never be demonstrated in the natural environment, and the conditions used in these experiments did not reflect those probably prevailing when life appeared on Earth.

A team of European scientists used an innovative correlative microscopy approach, combining several high-resolution imaging techniques, on samples collected by drilling at a depth of about 175 m in the ocean lithosphere during Expedition 304 of the International Ocean Discovery Program (IODP). Thanks to this method, scientists were able to observe amino acids, complex molecules essential to life, synthesised abiotically during the alteration of deep-sea rocks from the Atlantis Massif (Mid-Atlantic Ridge, 30°N).

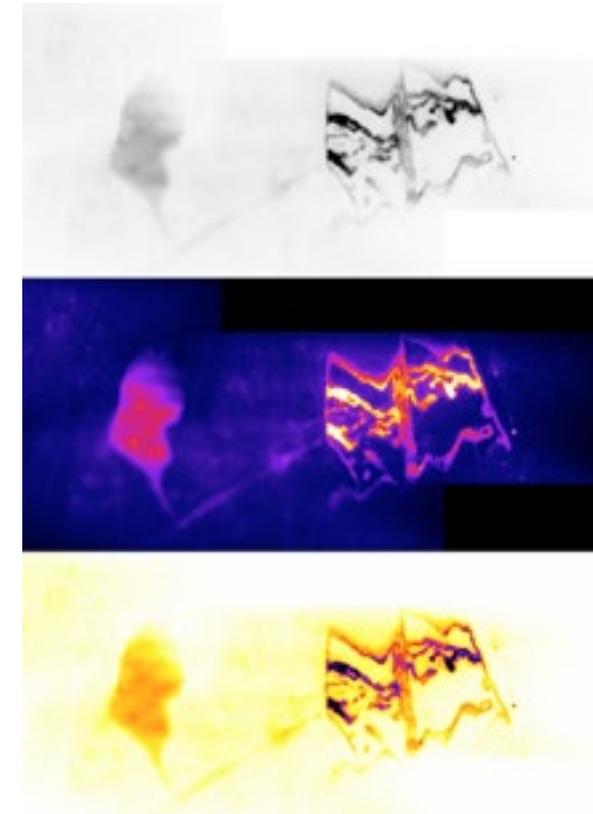
The interaction between seawater and the minerals in these rocks from the Earth's mantle, as well as the sheet structure of the clay resulting from the rocks' alteration, undoubtedly provided the ideal conditions for the formation of these primary constituents of the first building blocks of life, like a "geological mirror" to Miller's atmospheric experiments. This observation provides the first sure sign that such a process can occur in terrestrial rocks under condi-

tionnaires des premières briques du vivant, tel un « miroir géologique » aux expériences atmosphériques de Miller. Cette observation fournit le premier indice certain qu'un tel processus peut se produire dans des roches terrestres dans des conditions proches de celles qui régnaient sur la Terre primitive.

Cette découverte permet aussi de proposer une nouvelle voie de synthèse conduisant à la formation de différentes molécules d'intérêt prébiotique sur la Terre primitive ou d'autres planètes. Cette approche innovante et ces résultats essentiels fournissent également de nouvelles pistes pour de futures recherches dans les champs de la géobiologie et de l'astrobiologie, mais aussi pour toutes les disciplines liées au domaine des énergies renouvelables et des procédés chimiques et industriels « géo-inspirés ».

tions similar to those on the early Earth.

This discovery also makes it possible to propose a new synthesis pathway leading to the formation of different molecules of prebiotic interest on the primitive Earth or other planets. This innovative approach and these essential results also provide new avenues for future research in the fields of geobiology and astrobiology, as well as for all disciplines related to renewable energies and "geo-inspired" chemical and industrial processes.



Autofluorescence UV collectée sur la ligne de lumière DISCO du synchrotron SOLEIL mettant en évidence dans une argile la présence d'un acide aminé, le tryptophane, formé abiotiquement lors de l'altération de la croûte océanique. Autofluorescence UV collected on the DISCO light line of the Synchrotron SOLEIL showing in a clay the presence of an amino acid, tryptophan, formed abiotically during the alteration of the oceanic crust. © IGP



B. Ménez, C. Pisapia, M. Andreani, F. Jamme, Q.P. Vanbellingen, A. Brunelle, L. Richard, P. Dumas, M. Réfrégiers, "Abiotic synthesis of amino acids in the recesses of the oceanic lithosphere", *Nature*, doi:10.1038/s41586-018-0684-z

#2 Formation de la Lune à basse température Formation of the Moon at low temperature

La théorie dominante actuelle établit que la Lune serait composée de matériaux éjectés de la Terre (en particulier de son manteau, la zone rocheuse qui s'étend jusqu'à 2890 km sous nos pieds) suite à un impact « géant » avec un corps de la taille de la planète Mars. Cette théorie pourrait notamment expliquer pourquoi les roches volcaniques terrestres et lunaires partagent de nombreuses similitudes en termes de compositions chimiques.

Les deux astres présentent néanmoins de nombreuses disparités ; l'absence d'océans sur la Lune témoigne de l'extrême appauvrissement des roches lunaires en éléments volatils tels que l'hydrogène (qui forme de l'eau - H₂O - lorsqu'il est combiné avec de l'oxygène). Malgré cette observation fondamentale, la communauté scientifique continue de se questionner sur la manière dont la Lune est devenue si aride.

Dans ce cadre, les chercheurs de l'IPGP ont mesuré, dans des roches lunaires ramenées des missions Apollo, de légères variations de la teneur en isotopes du chrome (Cr), un élément devenant volatil dans des conditions oxydantes. Les isotopes sont des formes différentes d'un même élément chimique avec une masse légèrement différente, qui peuvent se séparer ou se fractionner selon les matériaux, tels que le liquide et le gaz. La particularité du chrome est qu'il forme plusieurs espèces chimiques en fonction du taux d'oxygène contenu dans l'atmosphère.

Selon la théorie de l'impact géant et les modèles numériques les plus récents, le matériel ayant formé la Lune aurait dû être vaporisé dans l'espace suite à une évaporation à très haute température (> 4000°C) due à l'impact. Dans une atmosphère réduite, le résidu de vaporisation devrait être enrichi en isotopes lourds du Cr, tandis que les isotopes légers auraient dû se perdre dans la phase gazeuse

The current dominant theory states that the Moon is composed of materials ejected from the Earth (in particular from its mantle, the rocky area that extends down to 2890 km below our feet) following a giant impact with a body the size of the planet Mars. This theory could explain why volcanic rocks on the Earth and the Moon share many similarities in terms of chemical composition.

However, the two bodies have many disparities; the absence of oceans on the Moon proves the extreme depletion of lunar rocks in volatile elements such as hydrogen (which forms water - H₂O - when combined with oxygen). Despite this fundamental observation, the scientific community continues to question how the Moon has become so arid.

In this context, the IPGP researchers measured slight variations in the content of isotopes of chromium (Cr), an element that becomes volatile under oxidising conditions, in lunar rocks brought back from the Apollo missions. Isotopes are different forms of the same chemical element with a slightly different mass, which can separate or fractionate depending on the materials, such as liquid and gas. The particularity of chromium is that it forms several chemical compounds depending on the oxygen content of the atmosphere.

According to the giant impact theory and the most recent numerical models, the material that formed the Moon should have been vaporised in space following evaporation at very high temperatures (> 4000°C) due to the impact. In a reduced atmosphere, the vaporisation residue should be enriched with heavy Cr isotopes, while the light isotopes should have been lost in the gas phase and then in space. However, the IPGP research team now reveals that chromium isotopes broke down in the opposite direction, reflecting an oxidising atmosphere during the formation of the Moon. This pro-

perty makes it possible to show, for the first time, that temperatures had to be much lower (< 1600°C) to create such an isotopic signature.

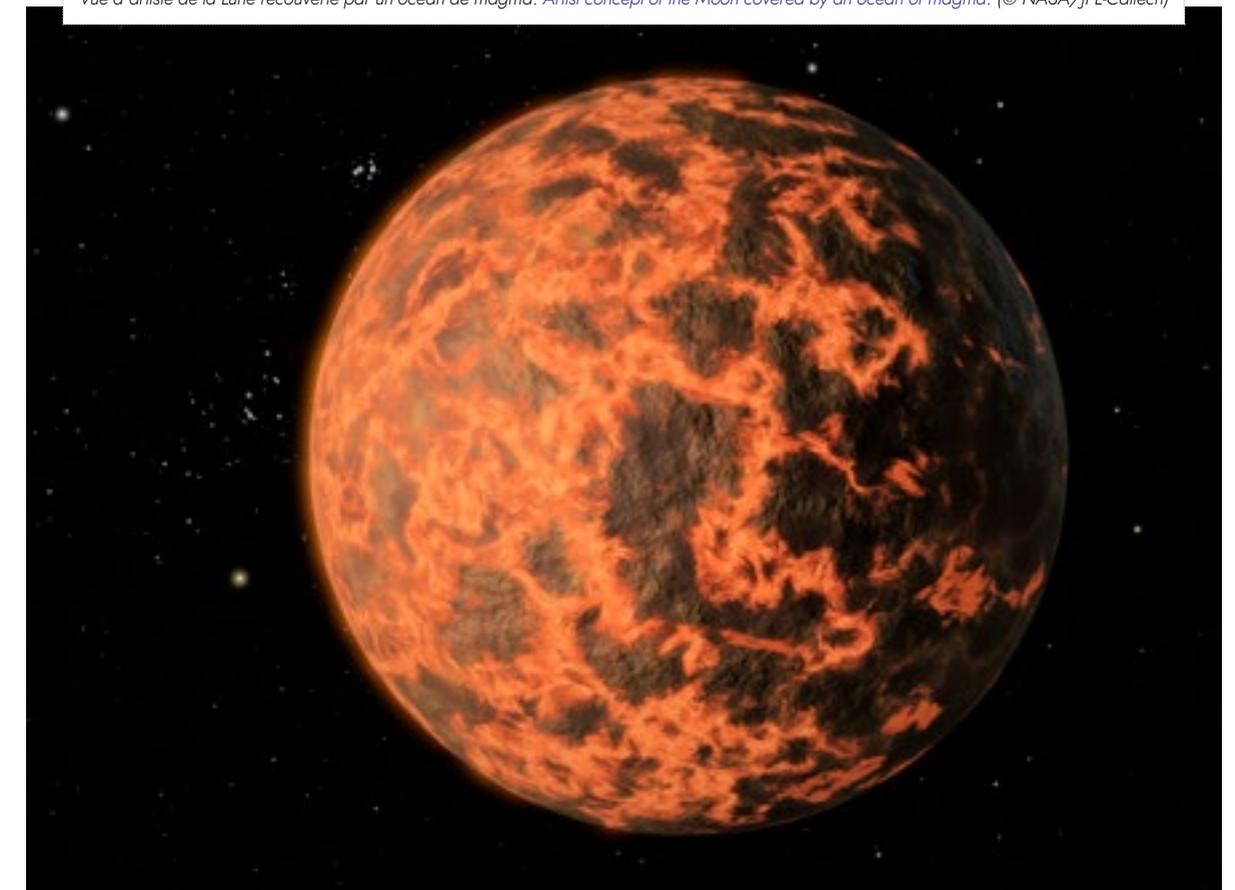
puis dans l'espace. Or, l'équipe de chercheurs de l'IPGP révèle aujourd'hui que les isotopes du chrome se sont fractionnés dans la direction opposée, témoignant ainsi d'une atmosphère oxydante lors de la formation de la Lune. Cette propriété permet de mettre en évidence, pour la première fois, que les températures devaient être beaucoup plus basses (< 1600°C) pour créer une telle signature isotopique.

Ainsi, cette étude révèle que la Lune avait déjà été formée et refroidie lorsque des substances volatiles ont été perdues, très probablement lors du dégazage d'un océan de magma à sa surface. La masse de la Lune, bien plus faible que celle de la Terre, signifie que sa gravité (qui représente 1/6 de la Terre à sa surface) ne peut retenir une atmosphère chaude, perdant ainsi son chrome et potentiellement son eau.



P. Sossi, F. Moynier & K. Van Zuilen, "Volatile loss following cooling and accretion of the Moon revealed by chromium isotopes", *PNAS*, doi: 10.1073/pnas.1809060115

Vue d'artiste de la Lune recouverte par un océan de magma. Artist concept of the Moon covered by an ocean of magma. (© NASA/JPL-Caltech)



#3

Cassini détecte pour la première fois des tempêtes de poussière sur Titan

Cassini detects dust storms on Titan for the first time

Les données de la mission internationale Cassini-Huygens, qui a exploré Saturne et ses lunes entre 2004 et 2017, ont révélé ce qui semble être des tempêtes de poussière dans les régions équatoriales de Titan. Cette observation aide les scientifiques à mieux comprendre l'environnement fascinant et dynamique de la plus grande lune de Saturne, très active, avec une géologie et un cycle d'hydrocarbures comparables à ceux observés sur Mars et sur la Terre. Cette étude démontre l'existence d'un cycle de la poussière qui serait constituée par des particules d'aérosols organiques produites dans l'atmosphère, lesquelles chuteraient pour s'accumuler au sol.

Data from the international Cassini-Huygens mission that explored Saturn and its moons between 2004 and 2017 revealed what appear to be dust storms in the equatorial regions of Titan. This observation helps scientists to better understand the fascinating and dynamic environment of Saturn's largest moon, which is very active, with geology and a hydrocarbon cycle comparable to those observed on Mars and on Earth. This study demonstrates the existence of a dust cycle that seems to consist of particles of organic aerosols produced in the atmosphere, which would fall to accumulate on the ground.



Vue d'artiste d'une tempête de sable sur Titan. Artist concept of a dust storm on Titan.
© IGP/UnivEarthS/Université Paris Diderot - C. Epitalon & S. Rodriguez

Lorsque Sébastien Rodriguez et son équipe repèrent de brefs sursauts de brillance près de l'équateur de Titan dans les images infrarouges de l'instrument VIMS (Visual and Infrared Mapping Spectrometer) à bord de Cassini, au moment de l'équinoxe de printemps entre 2009 et 2010, ils pensent tout d'abord à des nuages de méthane. La modélisation de leur signal infrarouge montre que, si ces événements singuliers sont effectivement d'origine atmosphérique, ils semblent être confinés très proche de la surface (à moins de dix kilomètres d'altitude). De plus, leur signature chimique semble indiquer qu'il s'agit plus vraisemblablement d'une couche ténue de minuscules particules organiques solides en suspension. Comme celles-ci se trouvent juste au-dessus des vastes mers de sable organique de Titan, il ne reste alors qu'une explication : ces événements seraient en fait de gigantesques nuages de poussière organique soulevés depuis les dunes.

Cependant près de la surface, la vitesse des vents doit être très forte pour soulever une telle quantité de poussière, environ cinq fois plus forte que la vitesse moyenne des vents estimée par les mesures de Huygens près de la surface et prédite par les modèles climatiques.

Des vents de surface aussi forts pourraient être liés aux puissantes rafales qui peuvent survenir au front des énormes tempêtes de méthane observées dans cette région à cette saison. Sur Terre, ce phénomène bien connu dans les régions désertiques est appelé « haboob » : il génère des tempêtes de poussière géantes juste avant de violents orages. L'existence des vents violents générant ces tempêtes de poussière, même transitoires, implique que le sable juste en dessous peut lui aussi être mis en mouvement et que les dunes couvrant les régions équatoriales de Titan sont toujours actives et continuent d'évoluer. De tels vents pourraient transporter la poussière soulevée par les dunes sur de grandes distances, contribuant ainsi au cycle global des poussières organiques et donc du carbone et pourraient provoquer des effets similaires à ceux observés sur Terre et sur Mars.

When Sébastien Rodriguez and his team spotted brief flashes of brightness near Titan's equator in the infrared images of the VIMS (Visual and Infrared Mapping Spectrometer) instrument aboard Cassini during the spring equinox between 2009 and 2010, they first thought of methane clouds. The modelling of their infrared signal shows that, while these singular events are indeed of atmospheric origin, they seem to be confined very close to the surface (at altitudes of less than ten kilometres). In addition, the chemical signature suggests that it is more likely to be a thin layer of tiny suspended solid organic particles. As these are located just above Titan's vast seas of organic sand, there is only one explanation left: that these events are in fact gigantic clouds of organic dust raised from the dunes.

However, near the surface, the wind speed must be very strong to lift such a large amount of dust - about five times higher than the average wind speed estimated by Huygens' measurements near the surface and predicted by climate models.

Such strong surface winds could be related to the powerful gusts that can occur at the front of the huge methane storms observed in this region during this season. On Earth, this phenomenon, well known in desert regions, is called "haboob": it generates giant dust storms just before violent storms. The existence of strong winds generating these dust storms, even if they are transient, means that the sand just below can also be set in motion and that the dunes covering the equatorial regions of Titan are active and continue to evolve. Such winds could transport dust from the dunes over long distances, contributing to the global cycle of organic dust and therefore carbon, and could cause effects similar to those observed on Earth and Mars.



S. Rodriguez et al., "Observational evidence for active dust storms on Titan at equinox", *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/s41561-018-0233-2

InSight

Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport

12^e mission du programme Discovery de la NASA à être lancée, le projet InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) est né en 2012 du besoin de déterminer de manière précise la structure interne de Mars et de mieux comprendre les processus de formation et d'évolution des planètes telluriques.

Suite à un décollage le 5 mai 2018 du centre spatial de Vandenberg en Californie à bord de la fusée Atlas V, la sonde s'est posée avec succès sur la plaine équatoriale d'Elysium le 26 novembre 2018, après un voyage de 485 millions de km et une descente de 125 km à travers l'atmosphère martienne.

InSight a ensuite entamé une séquence d'opérations complexe pour déposer au sol l'instrument principal de la mission conçu à l'IPGP, le sismomètre SEIS. Deux mois ont été nécessaires aux ingénieurs pour piloter le bras robotique muni d'un grappin et franchir plusieurs étapes clés : cartographie de la zone



Les ingénieurs du JPL Jamie Singer, Ken Hurst et Faray Alibay lors de la confirmation du déploiement de SEIS sur le sol martien, le 19 décembre 2018. JPL engineers Jamie Singer, Ken Hurst and Faray Alibay at the confirmation of SEIS deployment on Martian soil on 19 December, 2018. © IPGP/Philippe Labrot



La fusée Atlas V sur le pas de tir de Vandenberg quelques heures avant le lancement (5 mai 2018). The Atlas V rocket on the Vandenberg launch pad a few hours before launch (May 5, 2018). © IPGP/Philippe Labrot

The InSight project (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport), the 12th mission of NASA's Discovery Program to be launched, arose in 2012 from the need to accurately determine the internal structure of Mars and to better understand the formation and evolution processes of telluric planets.

Following its takeoff on 5 May 2018 from the Vandenberg Space Center in California aboard the Atlas V rocket, the probe successfully landed on the equatorial plain of Elysium on 26 November 2018, after a 485 million km journey and a 125 km descent through the Martian atmosphere.

InSight then began a complex sequence of operations to place the SEIS seismometer - the mission's main instrument, designed at the IPGP - on the ground. It took the engineers two months to pilot the grapple arm and complete several key steps: mapping the deployment area, placing the seismometer as far away from the lander as possible, optimising



Salle de contrôle du Jet Propulsion Laboratory lors de l'atterrissage d'InSight, le 26 novembre 2018. Control room of the Jet Propulsion Laboratory during the landing of InSight on November 26, 2018. © NASA/Bill Ingalls

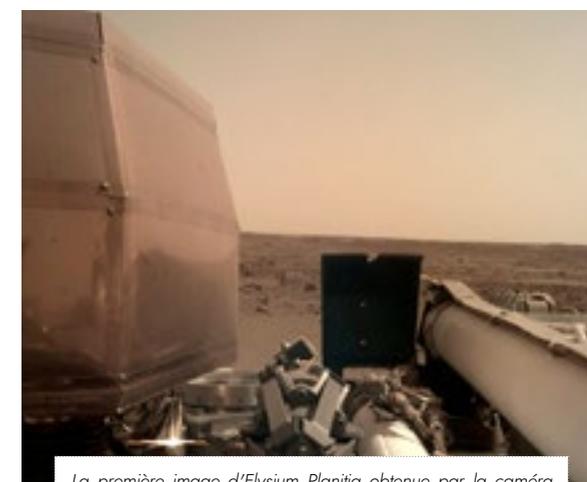
de déploiement, placement du sismomètre le plus loin possible de l'atterrisseur, optimisation de la position du câble reliant l'instrument à ce dernier et enfin positionnement d'un bouclier de protection éolien et thermique (WTS).

SEIS est épaulé dans sa mission d'écoute de l'activité sismique martienne par la sonde InSight, véritable observatoire géophysique à elle toute seule. Une station météorologique complète, équipée notamment d'un capteur de pression ultrasensible et d'un magnétomètre, permet de décorrélérer l'influence de l'environnement martien des signaux sismiques. Deux antennes radio fournissent des mesures très fines de la rotation de la planète et par conséquent de la distribution des masses internes. Enfin, le capteur de flux thermique HP³ sert à mesurer le gradient géothermique ainsi que différentes propriétés physiques du sol.



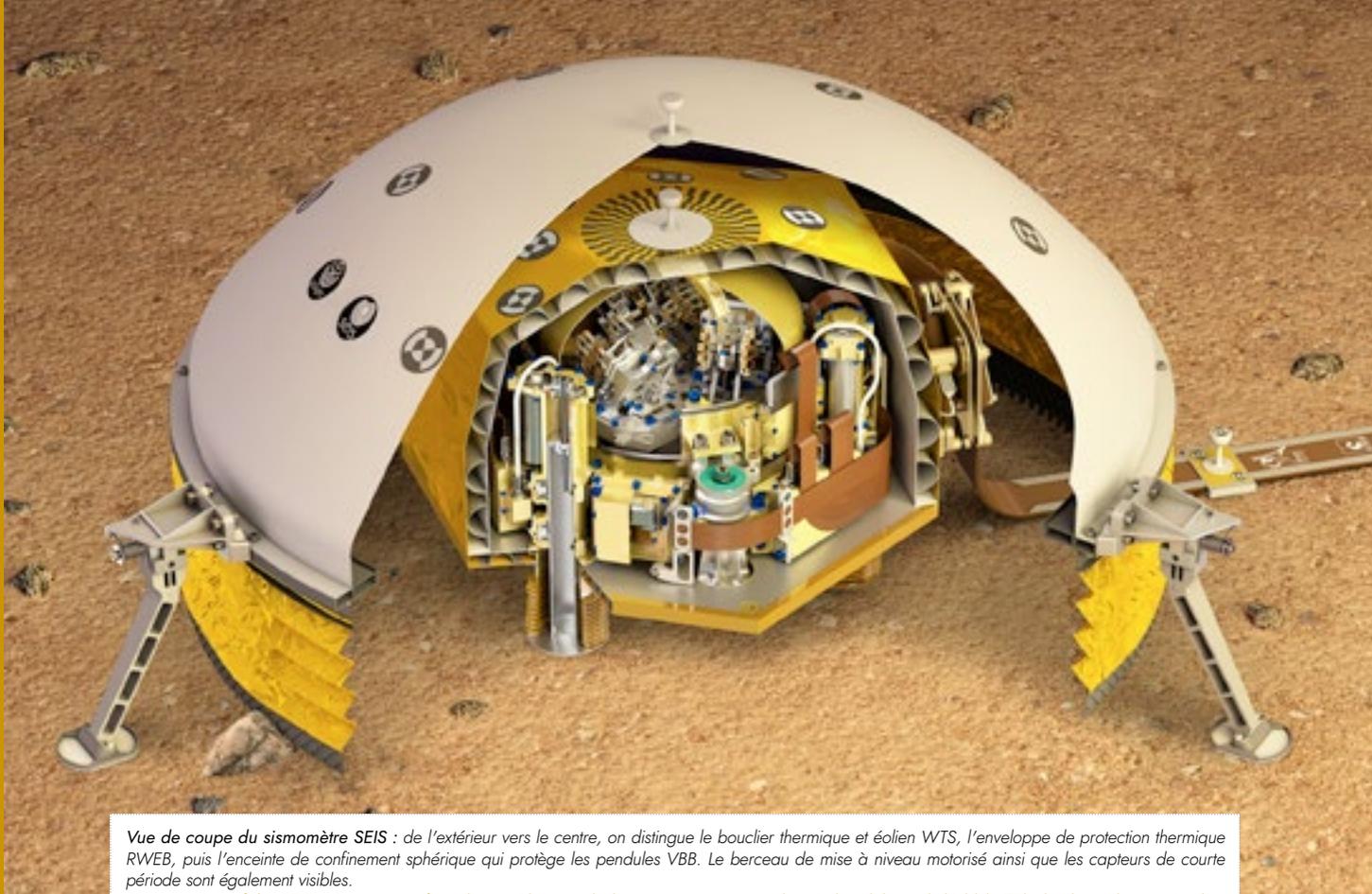
L'objectif principal de la mission InSight est de déterminer la structure interne de Mars. The main objective of the InSight mission is to determine the internal structure of Mars. © IPGP/David Ducros

the position of the cable connecting the instrument to the lander, and finally positioning a wind and thermal shield (WTS).



La première image d'Elysium Planitia obtenue par la caméra IDC du bras robotique au cours du sol 0. La zone de dépôt de la charge utile est visible. The first image of Elysium Planitia obtained by the IDC camera of the robotic arm during ground 0. The payload drop zone is visible. © NASA JPL-Caltech

SEIS is assisted in its mission by the InSight probe, a true geophysical observatory on its own. A complete meteorological station, equipped with an ultra-sensitive pressure sensor and a magnetometer, the InSight probe makes it possible to dissociate the influence of the Martian environment from the seismic signals. Two radio antennas provide very high-level measurements of the rotation of the planet and therefore of the distribution of internal masses. And the HP³ heat flow probe is used to measure the geothermal gradient and various physical properties of the soil.



Vue de coupe du sismomètre SEIS : de l'extérieur vers le centre, on distingue le bouclier thermique et éolien WTS, l'enveloppe de protection thermique RWEB, puis l'enceinte de confinement sphérique qui protège les pendules VBB. Le berceau de mise à niveau motorisé ainsi que les capteurs de courte période sont également visibles.

Cross-section of the SEIS seismometer: from the outside towards the centre, we can see the wind and thermal shield (WTS), the thermal protection box (RWEB - remote warm protection box), and the spherical containment chamber that protects the VBB pendulums. The motorised levelling cradle and short-period sensors are also visible. © IPGP/David Ducros

Le sismomètre SEIS et ses pendules très large bande VBB The SEIS seismometer and its very broad band (VBB) pendulums

Financé par le CNES, l'instrument SEIS est un appareil six axes particulièrement sophistiqué qui a bénéficié d'une large collaboration internationale et demandé plusieurs décennies de recherche et développement. L'instrument est structuré autour de trois pendules très large bande (VBB), développés en France par les équipes techniques et scientifiques de l'IPGP, du CNES, du campus spatial de l'université Paris Diderot et de l'industriel SODERN et couplés à trois autres capteurs courte période (SP), fournis par l'Angleterre.

Doté d'une résistance à toute épreuve, pour pouvoir faire face aux contraintes du milieu spatial, ses capteurs sont ultra-sensibles, capables de détecter les plus infimes mouvements de la surface martienne à l'échelle atomique.

Financed by the CNES, SEIS is a particularly sophisticated six-axis instrument that has benefited from extensive international collaboration and required several decades of research and development. The instrument is structured around three very broad



L'instrument SEIS avec son bouclier thermique et éolien à la surface de Mars, avec le capteur de flux thermique HP3 à côté. The SEIS instrument with its heat shield and wind shield on the surface of Mars, with the HP3 heat flow sensor next to it. © NASA JPL-Caltech

L'isolation des pendules de leur environnement extérieur passe par de multiples couches isolantes : sphère sous vide au sein de laquelle sont installés les pendules, couvercle isolant RWEB et bouclier thermique et éolien WTS.

Certains dispositifs ont été conçus spécifiquement pour s'adapter aux conditions particulièrement difficiles de Mars, tels que le mécanisme d'équilibrage, permettant d'adapter le pendule à la gravité réduite ou à l'inclinaison par rapport au sol ou encore le mécanisme de compensation thermique, qui donne la capacité aux pendules de s'accorder aux importantes variations de température propres à la météo martienne.

La réussite du déploiement de SEIS ouvre maintenant la voie à la détection des premiers séismes sur Mars, qu'ils soient provoqués par des ruptures dans la croûte ou le manteau, ou des impacts de météorites.



Jupe extensible du bouclier éolien et thermique (WTS), avec sa collerette en cottes de mailles. Extendable wind and heat shield skirt (WTS), with its chainmail collar. © NASA JPL-Caltech - IPGP/Philippe Labrot

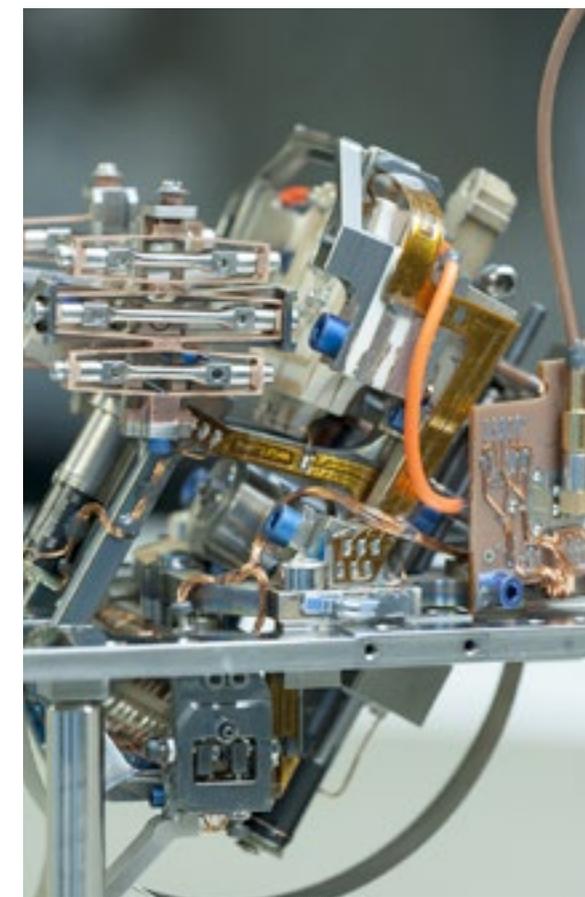
band (VBB) pendulums, developed in France by the technical and scientific teams of the IPGP, the CNES, the Université Paris Diderot space campus and the company SODERN, and coupled with three other short-period (SP) sensors, provided by England.

Able to withstand the harshest extremes and operate within the constraints of the space environment, its sensors are ultra-sensitive, capable of detecting the smallest movements of the Martian surface at the atomic level.

The pendulums are protected from their external environment by multiple insulating layers: the vacuum sphere in which the pendulums are installed, the insulating cover (RWEB), and the wind and thermal shield (WTS).

Some devices have been specifically designed to adapt to the particularly difficult conditions of Mars, such as the balancing mechanism, which allows the pendulum to adapt to reduced gravity and to the tilt relative to the ground, and the temperature compensation mechanism, which gives the pendulums the ability to adapt to the large temperature variations specific to Martian weather.

The successful deployment of SEIS now paves the way for the detection of the first earthquakes on Mars, whether caused by ruptures in the crust or mantle, or by meteorite impacts.



L'un des trois pendules très large bande (VBB) de SEIS. One of SEIS' three very wide band clocks (VBB). © IPGP - SODERN/Hervé Piraud

Plateformes de recherche

Research platforms

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

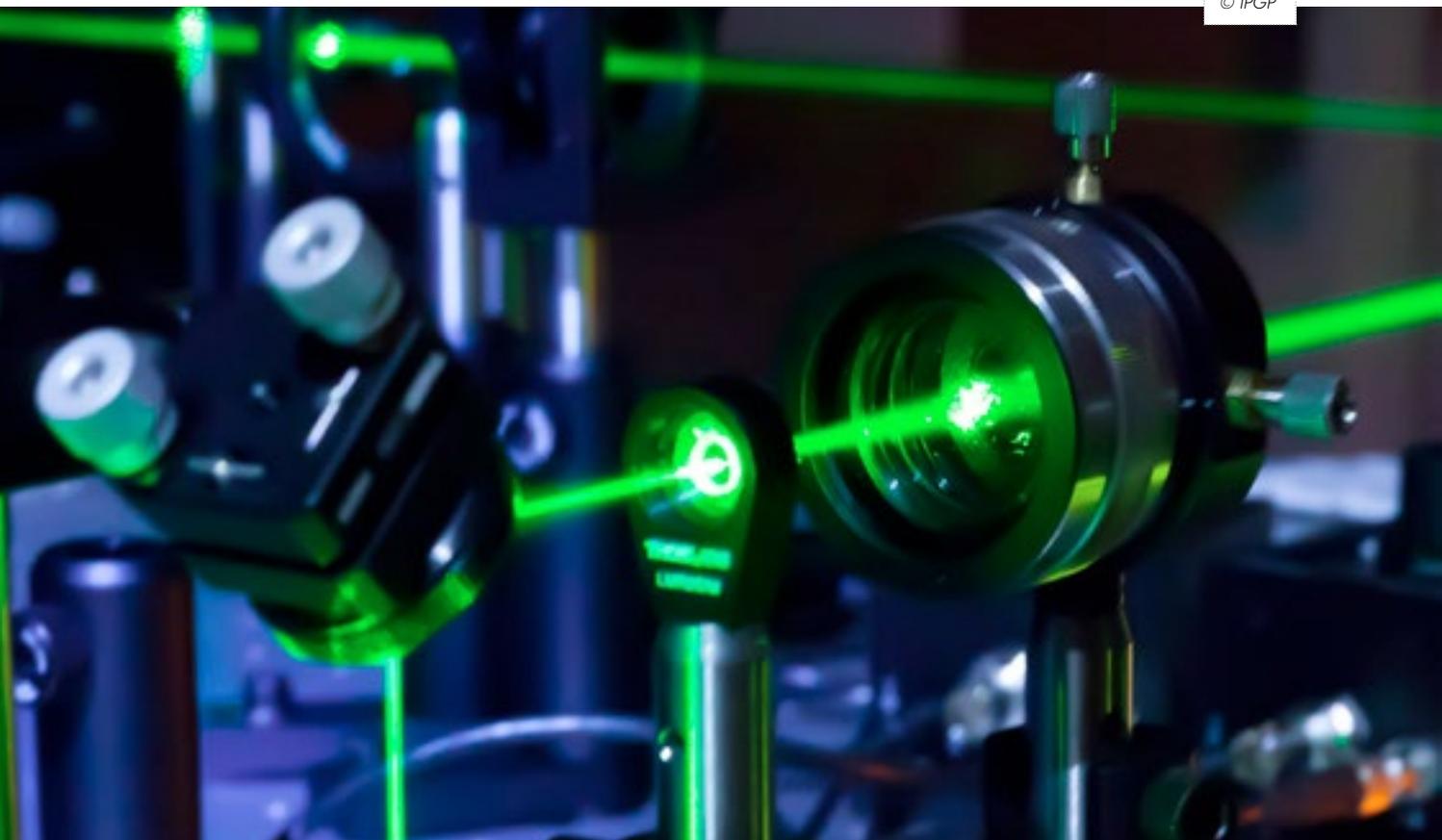
PARI dote l'IPGP d'une plateforme analytique de pointe, constituée d'une chaîne cohérente d'équipements innovants, permettant de répondre aux questions scientifiques fondamentales de la recherche en sciences de la Terre, de l'univers et de l'environnement.

Nos chercheurs, enseignants-chercheurs et personnels techniques abordent des problèmes scientifiques allant de l'échelle du système solaire à l'échelle atomique en passant par celle du globe terrestre et dans un intervalle de temps compris entre - 4,56 milliards d'années et aujourd'hui. Ces travaux nécessitent une palette d'instruments, regroupés dans une plateforme disposant d'une disponibilité et d'une visibilité importantes.

PARI provides the IPGP with a state-of-the-art analytical platform, consisting of a coherent chain of innovative equipments, to answer fundamental scientific questions in the Earth, Environment and Universe Sciences.

Our researchers and technical staff address scientific problems ranging from the solar system to the atomic scale, including that of the Earth, and in a time span from - 4.56 billion years to present day. This work requires a range of instruments, grouped in a platform with high availability and visibility.

© IPGP

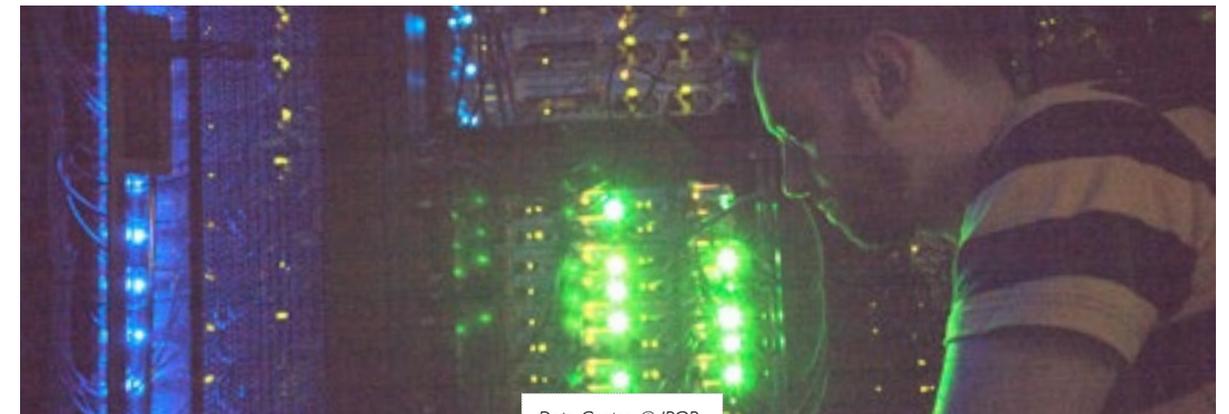


Service de calcul parallèle et de traitement de données en sciences de la Terre (S-CAPAD)

Parallel Computing and Data Analysis Platform for Earth Science

S-CAPAD a pour but d'associer étroitement autour des problèmes des sciences de la Terre et de l'environnement, dont la modélisation requiert des développements méthodologiques et numériques spécifiques, des ressources de pointe en matière de calcul intensif et des laboratoires possédant une forte culture d'observation et d'expérimentation.

S-CAPAD's aim is to bring cutting-edge resources in high-performance computing and laboratories with a strong culture of observation and experimentation together to take on issues in Earth and environmental sciences, in which modelling requires specific methodological and technological developments.

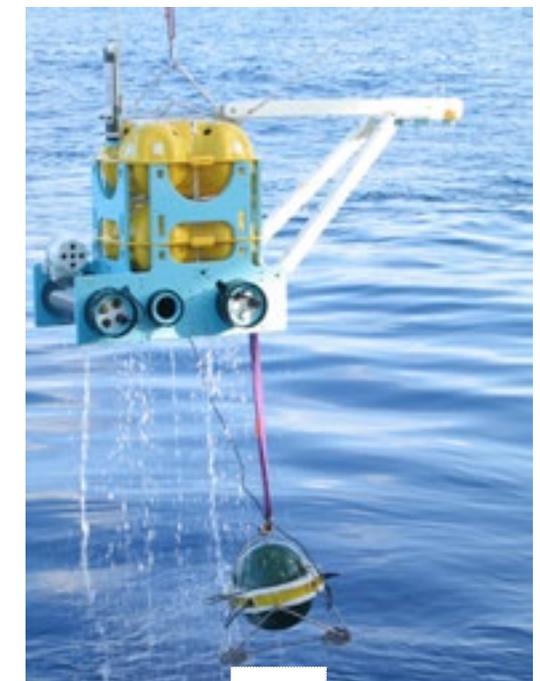


Data Center. © IPGP

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

Les OBS placés au fond des mers ou des océans enregistrent de façon autonome les ondes acoustiques et sismiques. L'origine de ces signaux peut être naturelle, générée par des tremblements de terre, ou artificielle, produite par des sources telles que des canons à air comprimé. Ces appareils, disponibles pour toute la communauté scientifique française, peuvent être utilisés pour localiser des tremblements de terre ou déterminer la structure des sous-sols sous-marins.

OBS placed on sea and ocean floors independently record acoustic and seismic waves. The origin of these signals can be natural, generated by earthquakes, or artificial, produced by sources such as compressed air cannons. These devices, which are available to the entire French scientific community, can be used to locate earthquakes or to determine the structure of layers beneath the ocean floor.



© IPGP

Observatoires Observatories



Observatoires magnétiques / Magnetic observatories

La mission du service d'observatoires magnétiques de l'IPGP est de fournir des données d'observations géomagnétiques et des données traitées de très haute qualité. Composante du bureau central de magnétisme terrestre (BCMT), il est un service national d'observation (SNO) du CNRS-INSU. Il collabore étroitement avec deux institutions françaises et huit institutions internationales. Il compte 12 observatoires à travers le monde incluant l'observatoire national français de Chambon-la-Forêt, celui d'Addis-Abeba en Ethiopie, Borok en Russie, Dalat et Phu Thuy au Vietnam, Edéa au Cameroun, Kourou en Guyane, Lanzhou en Chine, M'bour au Sénégal, Pamatai en Polynésie française, Tamanrasset en Algérie et sur l'île de Paques au Chili. Ces observatoires magnétiques font partie du réseau d'observation géomagnétique international INTERMAGNET et sont très fiables sur le long terme. Les données magnétiques fournies par les observatoires se classent principalement en 3 catégories : temps quasi réel, données quasi définitives, données définitives moyennées sur une seconde, une minute ou sur des périodes plus longues. Ces données sont diffusées en libre accès sur le site du BCMT (bcmt.fr) ; celui d'INTERMAGNET (intermagnet.org) et sur des DVD INTERMAGNET pour les données définitives ; ainsi que via les World Data Centres (WDC) pour le géomagnétisme localisé au Royaume-Uni, aux Etats-Unis et au Japon (ex : www.wdc.bgs.ac.uk).

The mission of the IPGP's service of magnetic observatories is to provide ground-based geomagnetic observations and derived data products of the highest quality. The service is a component of the "Bureau Central de Magnétisme Terrestre" (BCMT) appointed as "Service National d'Observation" (SNO) of the CNRS-INSU. It works closely with two French and eight international institutions. The service is operating 12 observatories worldwide including the French national observatory of Chambon-la-Forêt, Addis-Abeba in Ethiopia, Borok in Russia, Dalat and Phu Thuy in Vietnam, Edéa in Cameroon, Kourou in Guyana, Lanzhou in China, M'bour in Senegal, Pamatai in French Polynesia, Tamanrasset in Algeria and in Easter Island in Chile. These observatories are part of INTERMAGNET, an international geomagnetic observation organisation. They combine a high level of consistency and robustness in their long-term operations. The magnetic data provided by the observatories consist mainly of three categories: near real-time raw data, quasi-definitive data and definitive data. They are distributed either as 1-second data or 1-minute, or longer period, means. These data are freely available and currently distributed through: BCMT website (bcmt.fr); INTERMAGNET website (intermagnet.org); INTERMAGNET DVDs for final data; World Data Centres (WDC) for Geomagnetism located in UK, US and Japan (e.g www.wdc.bgs.ac.uk).



Container des senseurs magnétiques à l'observatoire d'Edéa. Installé sur un pilier enfouis dans le sol, il permet l'enregistrement continu des données de variation et de l'intensité du champ magnétique terrestre. Il se trouve à l'écart des constructions et voies de passage pour éviter la contamination des données par les activités humaines.

Container at Edéa observatory for magnetic variation sensors. These sensors, set on a concrete pillar, allow for a continuous recording of the magnetic field strength and direction. They are located away from buildings or pathways to limit perturbations due to human activities. © IPGP



Observatoire magnétique de Chambon-la-Forêt. *Magnetic Observatory of Chambon-la-Forêt.* © IPGP

- En février, les premières données calibrées du nouvel observatoire magnétique d'Edéa au Cameroun ont été distribuées. Un accord de coopération avait été signé fin 2012 entre l'IPGP et l'Institut de Recherche Géologique et Minière (IRGM) du Cameroun pour l'installation et l'exploitation de cet observatoire après la fermeture de celui de Bangui (République centrafricaine) l'année passée. Suite à la formation de l'équipe sur place début 2018 et à quelques ajustements sur les chaînes d'acquisitions de l'observatoire, celui-ci est désormais opérationnel. Une nouvelle intervention est prévue début 2019 pour que l'observatoire puisse atteindre le niveau de qualité et de précision requis par INTERMAGNET.
- Le conseil scientifique du BCMT d'octobre a adopté un plan stratégique de développement sur cinq ans incluant des objectifs de maintenance du réseau d'observatoires, de gestion des données (traitement et diffusion), de développement de nouveaux instruments de mesure et de mise en place de nouvelles chaînes d'acquisitions. Un intérêt croissant est porté à la météorologie de l'espace car bien que la France soit à des latitudes géomagnétiques relativement basses, les perturbations de l'ionosphère et de la magnétosphère, associées à des éruptions solaires, peuvent être suffisamment grandes pour limiter
- In February, the first calibrated data from the new Edéa magnetic observatory were released. The site of Edéa, Cameroon, had been selected in early 2012 for the installation of a magnetic observatory in replacement of Bangui (Central African Republic) observatory closed in 2011. An agreement was signed in late 2012 between the IPGP and the Cameroon's "Institut de Recherche Géologique et Minière" (IRGM) to define the framework for a new observatory operation. Following the training of the team on site at the beginning of 2018 and some adjustments to the observatory's acquisition chains, it is now operational. Further small improvements are planned for the beginning of 2019 for the observatory to reach the level of robustness and consistency required by INTERMAGNET.
- The scientific council in October agreed upon the strategic development plan for the BCMT that defines the main projects and set the objectives of the BCMT for the coming 5 years. In particular objectives were set regarding the observatory network maintenance, the data management (processing and distribution) and the development of new instruments and acquisition chains. A significant evolution of the IPGP's magnetic observatory activities is linked to growing interest in space-weather. Although France is at

la précision des systèmes de positionnement par satellite comme le GPS ou encore interdire l'utilisation de moyens de communication HF. Les données magnétiques, comme celle produites par le service d'observation de l'IPGP, sont très sensibles à ces perturbations et sont donc une source d'information majeure.

- Un nouveau laboratoire de paléomagnétisme a ouvert sur le site de l'observatoire magnétique national de Chambon-la-Forêt, étendant ainsi les activités scientifiques de ce dernier.
- Visite de César Valladares, chercheur à l'Université du Texas en charge du réseau LISN suivant l'activité ionosphérique en Amérique du Sud (stations GNSS, ionosondes et magnétomètres), qui est resté un mois.

relatively low geomagnetic latitude, the perturbations of the ionosphere and magnetosphere associated with solar events can be sufficiently large to limit the accuracy of positioning devices like GPS and preclude usage of HF communication. Magnetic data, such as those provided by the observation service, are highly sensitive to magnetospheric and ionospheric perturbations. They therefore stand as one of the main tools to assess at ground level the impacts of perturbations associated with space-weather events.

- A new paleomagnetic laboratory has opened at the National magnetic observatory in Chambon-la-Forêt, extending the range of scientific activities made on site.
- Visit of Cesar Valladares, research fellow at the University of Texas where he is in charge of the network of instruments LISN (e.g. GNSS stations, ionosondes and magnetometers) that monitors the ionosphere over South America. He stayed a month at the national observatory.

Observatoire GEOSCOPE / GEOSCOPE observatory

La mission de l'observatoire GEOSCOPE est de fournir des données sismologiques large bande validées, de haute qualité, aux communautés sismologiques françaises et internationales. GEOSCOPE est constitué d'un réseau de 33 stations sismologiques, toutes équipées pour fournir des données en temps (quasi) 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 des 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. La plupart des stations sont entretenues par l'IPGP (23 stations), son centre de données effectuant la validation et la

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, all of which are equipped to provide (near) 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 EOST in Strasbourg. A majority of stations is maintained by the IPGP (23 stations) and the data validation and distribution is done through the IPGP Data Center, with data also available through RESIF and IRIS data centers. Data are extensively used by the scientific community (about

distribution des données, lesquelles sont également disponibles via les centres de données RESIF et IRIS. Ces données sont largement utilisées par la communauté scientifique (environ 1300 publications mentionnent explicitement GEOSCOPE depuis 1982, liste disponible sur le site de GEOSCOPE), mais également par l'observatoire lui-même afin de fournir des analyses telles que l'estimation rapide des paramètres de sources d'un tremblement de terre (catalogue disponible sur le site de GEOSCOPE). L'équipe est composée de 9 personnes, 5 de l'IPGP et 4 de l'EOST (3 chercheurs, 5 ingénieurs et un administratif).

En 2018, les activités et progrès principaux ont été les suivants :

- **Travaux pour améliorer et entretenir le réseau existant :** à Wallis et Futuna, installation d'un capteur à 5 m de profondeur. Pour les stations des Îles Kerguelen, Amsterdam (Océan indien), de Nouvelle Calédonie, du Brésil et de la Guyane, amélioration de la qualité du signal et/ou de la transmission. poursuite des travaux de préparation pour la nouvelle instrumentation de la station sur la base de Concordia (Antarctique).
- **Contrôle de la qualité des données avant archivage :** amélioration du protocole de vérification de la qualité des données avant transfert au centre de données de l'IPGP. Utilisation du bruit enregistré à chaque station et de la comparaison (pour chaque séisme bien enregistré à l'échelle globale) entre données observées et données simulées.
- **Anticipation du vieillissement des capteurs large-bande STS1 :** rencontre avec les principaux acteurs de l'instrumentation à l'échelle globale (en particulier GSN - Etats-Unis et GEOFON - Allemagne) organisée en janvier

Installation du nouveau capteur (« posthole ») à Futuna, à 5 mètres de profondeur (août 2018). Installation of a new sensor (« posthole ») in Futuna, at 5-meter depth (August 2018). © IPGP

1,300 publications with explicit mention to GEOSCOPE since 1982, list available on the GEOSCOPE website), and also inside the observatory : GEOSCOPE provides data products, such as the rapid estimation of earthquake source parameters (catalog available on the GEOSCOPE website). The staff members consist of 9 persons, 5 from the IPGP and 4 from EOST (3 researchers, 5 engineers, and 1 administrative).

Main activities and progress in 2018:

- **Improving and maintaining the existing network:** in Futuna (SouthWest Pacific Ocean), installation of a post-hole sensor at 5-meter depth. For stations located in the Kerguelen and Amsterdam islands (Indian Ocean), in New Caledonia, in Brazil and in Guyana, improvement of the signal and/or data transmission quality. Preparative works for the new instrumentation of the Concordia station (Antarctica) have been pursued.
- **Data quality control before archiving:** improvement of the protocol for data quality control before transfer to the IPGP Data Center. Use of the seismic noise recorded at each station and of the comparison (for each earthquake well recorded at the global scale) between observed and synthetic waveforms.



Station ATD - Arta Cave - Arta, République de Djibouti. ATD Station - Arta Cave - Arta, Republic of Djibouti © IPGP

2018 à l'IPGP. Pour GEOSCOPE, choix d'une stratégie mixte entre achat de capteurs de nouvelle génération (1 STS6A commandé cette année) et amélioration de la longévité des STS1.

- **Amélioration de la diffusion des produits dérivés** mis en place par l'observatoire, en particulier concernant les informations sur les séismes récents (présent sur Twitter : @geoscope_ipgp).
- **Nouvelles mises en évidence de la qualité des données GEOSCOPE :** les stations à bas bruit constituent la majorité du réseau et ont permis depuis les débuts de GEOSCOPE des analyses fines de la structure terrestre et des sources sismiques. Nous avons montré cette année que les stations sont capables de détecter les nouveaux signaux d'élastogravité précoces (récemment découverts par Montagner et al., 2016, et Vallée et al., 2017), comme le montre l'enregistrement de la station NOUC pendant le séisme des Iles Fidji d'août 2018 (Mw 8.2).

- **Anticipation of the ageing of the STS1 broadband sensors:** meeting with the main actors of the global seismology instrumentation (in particular GSN-USA and GEOFON-Germany) organized in January 2018 at the IPGP. For GEOSCOPE, choice of a mixed strategy between buying new-generation sensors (1 STS6A ordered this year) and improving the STS1 longevity.
- **Improvement of the dissemination of the derived products** developed by the Observatory, in particular for the rapid information about recent earthquakes (see Twitter account: @geoscope_ipgp).
- **New evidences of the quality of the GEOSCOPE stations:** most of the stations have a low seismic noise, which enables fine analyses of the Earth structure and of the seismic sources. We have shown this year that GEOSCOPE stations well recorded the tiny prompt elastogravity signals (recently discovered by Montagner et al., 2016 and Vallée et al., 2017), as illustrated by the record of the NOUC station during the 2018 deep Fidji earthquake (Mw 8.2).

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 suspendue, 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 la granulométrie et la morphologie de plusieurs rivières en utilisant des images aériennes acquises par un drone ainsi qu'un lidar terrestre. 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, trem-

The observatory of erosion in the Antilles (OBSERA) monitors the evolution of environmental variables (e.g. rainfalls, river discharge, conductivity, suspended load, chemical composition of soils, rivers and precipitations, etc.) in 4 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 and a terrestrial lidar. 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 monitoring sediment transport by rivers and slope processes and characterizing the ecosystem dynamics; to investigate how extreme events (floods induced by heavy rains and tropical storms,

lements de terre, etc.) influencent les cycles géochimiques (comme le cycle du carbone), les taux de dénudation et la morphologie des paysages. OBSERA est membre du SOERE-RBV (Système d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement - Réseau des Bassins Versants). Il est aussi impliqué dans la création 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 : <https://morpho.ipgp.fr/obserra>

L'ouragan Maria, un cyclone tropical de catégorie 5, a frappé l'île de Basse-Terre en septembre 2017, provoquant d'importantes crues dans les trois bassins surveillés par OBSERA. En moins de 24 heures, 160 mm de pluies - près d'un mois de précipitations en temps normal - se sont déversées sur le bassin versant de la ravine Quiock (Fig. 1a). Les nombreuses chutes d'arbres ont fort heureusement épargné les instruments de mesure (Fig. 2).

Un canal Venturi, installé dans le lit de la ravine Quiock, mesure le débit de ce torrent. Les pluies massives ont fait monter le niveau d'eau bien au-dessus des limites du chenal (Fig. 1b), empêchant les instruments d'enregistrer le débit maximum de crue. Une estimation suggère que le débit a atteint des valeurs supérieures à 10 fois le débit moyen du torrent en temps normal. Les forages piézométriques installés dans ce même bassin montrent que la nappe a atteint des niveaux records, débordant du sol par endroits (Fig. 1b). Ce phénomène, assez rare, est appelé ruissèlement de saturation.

L'important rôle fertilisant des poussières atmosphériques et en particulier des poussières africaines, dans la forêt tropicale humide, est de plus en plus reconnu mais mal quantifié. Afin de mieux contraindre l'apport de ces poussières dans la Caraïbe, un échantillonnage des compartiments de la zone critique du bassin versant de la ravine Quiock a été réalisé (sols, roches mères, poussières atmosphériques, plantes, solutions de sol, cours d'eau et eaux de pluie).

earthquakes, etc.) influence geochemical cycles (e.g. carbon cycle), denudation rates and landscape morphology. OBSERA participates to the Network of Drainage Basins (SOERE-RBV). OBSERA is also involved in the creation of the Very Large Research Infrastructure (TGIR) OZCAR. The data from OBSERA are made freely available to the scientific community on the website: <https://morpho.ipgp.fr/obserra>

Hurricane Maria, a category 5 tropical cyclone, struck Basse-Terre island in September 2017, triggering important floods in the three catchments monitored by OBSERA. Within 24 hours, the Quiock catchment collected 160 mm of rainfall-nearly a month of average rainfall in normal circumstances (Fig. 1a). The storm did not damage the measurement devices which, fortunately, falling trees spared (Fig. 2).

A venturi channel, installed in the bed of the Quiock creek, monitors the stream discharge. However, the massive rainfall caused the Quiock creek to overflow the channel during most of the event (Fig. 1b), preventing the instruments from measuring the peak discharge of the flood. Yet, a rough estimate suggests that the discharge may have reached more than ten times its average value.

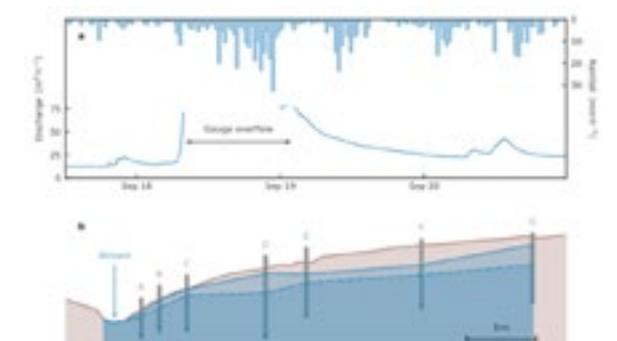


Figure 1 : (a) Débit du torrent et taux de précipitations enregistrés dans le bassin versant de Quiock pendant l'ouragan Maria. La capacité maximum de la jauge est de $76 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. (b) Coupe transversale de l'aquifère peu profond. Ligne bleue continue : plus haut niveau de la nappe phréatique pendant l'ouragan. Ligne bleue pointillée : plus bas niveau de la nappe pendant Maria. Les rectangles gris et les points noirs indiquent la surface du sol, les trous de forage et les capteurs de pression. (a) Stream discharge and rainfall rate recorded in the Quiock catchment during Hurricane Maria. The discharge gauge capacity is $76 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. (b) Cross section of the shallow aquifer. Solid blue line: highest elevation of the water table during Hurricane Maria. Dotted blue line: smallest elevation of the water table during Hurricane Maria. Brown line, gray rectangles and black dots indicate ground surface, boreholes and pressure sensors respectively. © IPGP



© IPGP

© IPGP



Figure 2 : Photo du canal Venturi, installé dans le lit de la ravine Quiock. Les chutes d'arbres ont fort heureusement épargné l'installation. View of the Venturi channel installed in the Quiock creek. Fortunately, the trees taken aback by the hurricane spared the installation. © C.Dessert

Les résultats montrent que seule l'altération chimique des poussières contenues dans le sol superficiel peut fournir des nutriments à l'écosystème (30 premiers cm), le sol plus profond étant totalement lessivé. Le bilan de masse cationique à l'échelle du bassin, ainsi que la signature isotopique en Sr, soulignent que les flux de cation et de Sr sont uniquement d'origine atmosphérique et que le substrat rocheux d'origine andésitique ne participe plus à l'apport de nutriments. À l'échelle sol-plante (Fig. 3), les flux de nutriments fournis par la végétation (litière + excrétion de feuilles) sont plus importants que les flux d'entrée et de sortie dans le bassin. Les flux de Ca, K, Sr et Mg transitant chaque année dans la végétation sont respectivement 31, 28, 20 et 3 fois plus importants que les flux exportés à la sortie du bassin. Cela souligne la grande efficacité du recyclage par la végétation qui domine le cycle des éléments nutritifs dans le bassin versant de Quiock Creek.

Cette première caractérisation des cycles biogéochimiques dans la forêt guadeloupéenne suggère que l'écosystème de Quiock Creek est alimenté par un réservoir superficiel d'éléments nutritifs, déconnecté du substrat rocheux andésitique profond. Il s'avère que même avec un recyclage efficace des

The piezometric wells installed in the Quiock catchment show that the water table rose to extreme height to accommodate the intense rainfall (Fig. 1b). This rise brought the water table over the ground level in the first few meters surrounding the river, a phenomenon known as saturation overflow.

The important fertilizing role of atmospheric dust, and particularly African dust, in tropical rainforest is increasingly recognized but still poorly quantified. To better constrain dust input into Caribbean basin, a sampling of critical zone compartments of the Quiock catchment was realized (soils, parent rock, atmospheric dust, plants, soil solutions, stream and rain waters).

The results show that only the chemical weathering of the near-surface dust can provide nutrients to the ecosystem (first 30 cm of soil). The cationic mass balance at the catchment scale, as well as Sr isotopic signature, highlight that cation and Sr fluxes are of atmospheric origin only and that original andesitic bedrock does not participate in nutrient cycles any more. At the soil-plant scale (Fig. 3), the cationic nutrient fluxes provided by vegetation (litter fall + leaf excretion) are major compared to input and output fluxes. The Ca, K, Sr and Mg fluxes being involved

éléments nutritifs sur de longues périodes, les poussières sahariennes jouent un rôle important dans le maintien de la productivité de l'écosystème en Guadeloupe.

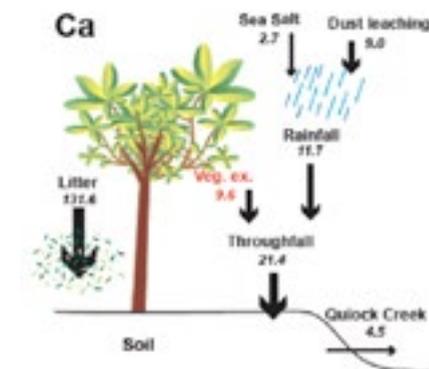


Figure 3 : Flux de Ca exprimés en kg/ha/yr dans le bassin versant de la ravine Quiock. Ca fluxes expressed in kg/ha/yr in the Quiock Creek catchment. © C.Dessert

each year in the vegetation are, respectively, 31, 28, 20 and 3 times greater than the exported fluxes at the outlet of the basin. It emphasizes the highly efficiency of vegetation turnover that dominates nutrient cycle in the Quiock catchment.

This first characterization of biogeochemical cycles in Guadeloupean forest suggests that the Quiock Creek ecosystem is sustained by a tight near-surface nutrient pool disconnected from the deep andesitic bedrock. We also demonstrated that, even with efficient nutrient recycling, over long time-scales, Saharan dust plays a significant role to maintain ecosystem productivity in Guadeloupe.

Observatoires volcanologiques et sismologiques Volcanological and seismological observatories

L'IPGP est chargé de la surveillance des trois volcans actifs situés dans les territoires français d'outre-mer (la Soufrière de Guadeloupe, la Montagne Pelée en Martinique et le Piton de la Fournaise à La Réunion) et enregistre la sismicité régionale ainsi que les tsunamis éventuels. Les observatoires volcanologiques et sismologiques (OVSG, OVSM et OVPF) de l'IPGP collectent des données géologiques, géophysiques et géochimiques sur de longues périodes afin d'améliorer la connaissance et la modélisation des processus volcaniques sur des volcans actifs dans leur contexte tectonique. Ces informations permettent d'alimenter des bases de données multi-paramètres mises à disposition de la communauté scientifique et d'informer les autorités en charge de la protection civile en cas de changement d'activité des volcans et des séismes ressentis au niveau local et régional.

Au cours des dernières années, les observatoires français aux Antilles, en collaboration avec le centre de recherche sismique de Trinidad et Tobago (SRC), ont modernisé les réseaux de surveillance sismique

The IPGP is in charge of the monitoring of the three active volcanoes located in the French overseas territories (the Soufrière of Guadeloupe, the Montagne Pelée in Martinique, and the Piton de la Fournaise in La Réunion) and recording the permanent regional seismicity as well, including the potential formation of associated tsunamis. The real-time observations and research contribute to the prevention and mitigation of seismic and volcanic risks. The volcanological and seismological observatories (OVSG, OVSM and OVPF) of the IPGP are dedicated to collecting geological, geophysical and geochemical data over long periods of time to improve the understanding and modelling of volcanic processes at active volcanoes in their tectonic context, to build up long-term multi-parameters databases available to the scientific community, and to inform the authorities in charge of civil protection of any increase in the activity of the volcanoes and after periods of local and regionally felt earthquakes.



© IPGP

et géodésique avec des communications satellites en temps réel. Le réseau régional du consortium IPGP-SRC couvre l'ensemble de l'arc des Antilles et alimente le système d'alerte aux tsunamis caribéen, financé par l'UNESCO. En 2018, dans le cadre du projet PREST-Interreg visant à mettre en place une plateforme régionale de surveillance tellurique en mer, l'observatoire de la Martinique (OVSM) a été impliqué dans des enseignements pour un master en géosciences à l'université d'État d'Haïti. Il a aussi déployé un réseau sismique et géodésique temporaire dans le sud de Cuba.

Les observatoires collaborent étroitement avec le centre de données de l'IPGP pour diffuser des données volcanologiques et sismologiques à la communauté scientifique via des centres de données nationaux et internationaux (RESIF, FDSN-IRIS-DMC) et la base de données Volobsis (www.volobsis.ipgp.fr). Ils travaillent également dans le cadre d'EPOS pour harmoniser les standards de données et de métadonnées au niveau européen. En 2018, les observatoires et le centre de données de l'IPGP ont collaboré pour promouvoir la diffusion de données géophysiques, autres que sismologiques, en

In the last few years, the French West Indies observatories in collaboration with the UWI Seismic Research Centre (SRC, University of West Indies), have modernized the Lesser Antilles Arc seismic and geodetic monitoring networks with satellite communication for real-time data transfer. The regional network of the IPGP-SRC consortium covers the whole Antilles arc and feeds the Caribbean Tsunami Warning System supported by UNESCO. In 2018, in the framework of the PREST INTERREG project which aims at building a Regional Platform for State-of-the-art Telluric monitoring on ocean bottom, the observatory of Martinique has been involved in teaching for a geosciences master degree in Haïti State University and deployed a temporary seismic and geodetic network in the southern part of Cuba. Initial goals and design definition of the autonomous marine monitoring platform were also initiated in 2018.

The observatories have a strong collaboration with the IPGP Data Center to disseminate volcanological and seismological data to the scientific community via national and international data centers (RESIF, FDSN-IRIS-DMC) and the volobsis database (www.volobsis.ipgp.fr). They are also working within

utilisant les standards opérationnels définis par la communauté sismologique et ont également ouvert un nouveau service de diffusion des rapports d'activité volcanologiques. En outre, les observatoires ont participé à cinq projets de recherche nationaux (ANR) et à un projet de réseau européen (EURO-VOLC) afin de favoriser les synergies au sein de la communauté volcanologique fragmentée.

Progrès réalisés en 2018 dans les réseaux d'observation

Les trois observatoires exploitent des réseaux de surveillance composés de 134 stations sismiques, 55 stations GNSS (système mondial de navigation par satellite) et 14 capteurs géochimiques qui transmettent leurs données en temps réel. Les 17 inclinomètres et extensomètres fournissent des informations complémentaires sur la déformation des volcans, tandis que les stations météorologiques (12 sites) fournissent des paramètres environnementaux essentiels à l'interprétation des autres données volcanologiques. Des caméras thermiques et optiques (10 sites) surveillent la phénoménologie sur des stations permanentes ou lors de survols en hélicoptères et drones. Deux marégraphes, opérés par l'observatoire de Guadeloupe, participent aussi

the EPOS framework to harmonise data and meta-data standards at European level. In 2018, the observatories and the IPGP Data Center worked together to promote the dissemination of slow rate geophysical data using the available and operational seismology standards and also opened a new service that disseminates volcano reports. Moreover, volcano observatories participated in five different ANR national research projects and one European networking project (EUROVOLC) to foster synergies in the fragmented volcanological community.

Progress achieved in 2018 in the observational networks

The three observatories operate a core network of 134 seismic stations, 55 GNSS (Global Navigation Satellite System) stations, and 14 geochemical sensors that transmit their data in real or near real-time. The 17 tiltmeters and extensometers stations provide complementary information about volcano deformation, whereas meteorological stations (12 sites) provide key environmental parameters to the volcanological data. Thermal and optical cameras (10 sites) monitor the phenomenology on permanent stations or through helicopter and



© IPGP

au système d'alerte aux tsunamis dans la Caraïbe. En outre, les observatoires acquièrent des données de campagnes de réitération pour la déformation (96 sites) et des échantillonnages (36 sites) pour des analyses géochimiques sur plus de 232 sites.

- En 2018, le réseau GNSS de surveillance des déformations sur la Soufrière a été renforcé avec quatre nouvelles stations permanentes sur le dôme afin de détecter et de modéliser les instabilités gravitaires des flancs sud du volcan, ainsi que de la mise en pression du système hydrothermal à faible profondeur. Une ancienne station distale, fondamentale dans la géométrie du réseau, car elle permet de suivre l'activité profonde, a été équipée de nouveaux capteurs sismiques et GNSS.
- Le réseau sismique et acoustique de détection des lahars de la rivière Prêcheur a été modernisé en Martinique afin de mieux caractériser et différencier les flux de lahars alimentés par les effondrements récurrents de la falaise Samperre.

drone surveys. Two tide-meters are also operated in Guadeloupe as part of the Caribbean Tsunami Warning System. Overall the observatories also provide data from re-iteration surveys and sampling at more than 232 sites essentially for deformation (196 sites) and geochemistry (36 sites).

- In 2018, the GNSS deformation monitoring network on the Soufrière volcano was reinforced with four new permanent stations on the dome to enhance the capacity to detect and model basal gravity sliding of the southern flanks and pressurization of the shallow hydrothermal system. A distal old station that is fundamental in the network geometry and for insuring safe and quality monitoring of deep-sourced unrest was equipped with new seismic and GNSS sensors.
- The seismic and acoustic detection network of lahars in the Prêcheur river was modernized in Martinique to ensure better characterization and differentiation of lahars triggered by recurrent collapse of the Sampere cliff.



- Sur le Piton de la Fournaise, les tempêtes de la saison des pluies et l'éruption d'avril 2018 ont endommagé six stations sismiques et GNSS sans pour autant anéantir les capacités de surveillance du volcan. De plus, l'OVPF a profité d'une collaboration avec l'Institut national italien de géophysique et volcanologie (INGV) pour installer une nouvelle station de mesure du CO₂ dans le sol près de la falaise de la caldera « Enclos Fouqué ».

- Storms of the rainy season and the April 2018 eruption damaged six seismic and GNSS stations on Piton de la Fournaise. The observatory of La Réunion took advantage of a collaboration with the Italian National Institute of Geophysics and Volcanology (INGV) to install a new CO₂ station close to the cliff of the "Enclos Fouqué" caldera.

Seismic and volcanic activity:

Activité sismique et volcanique

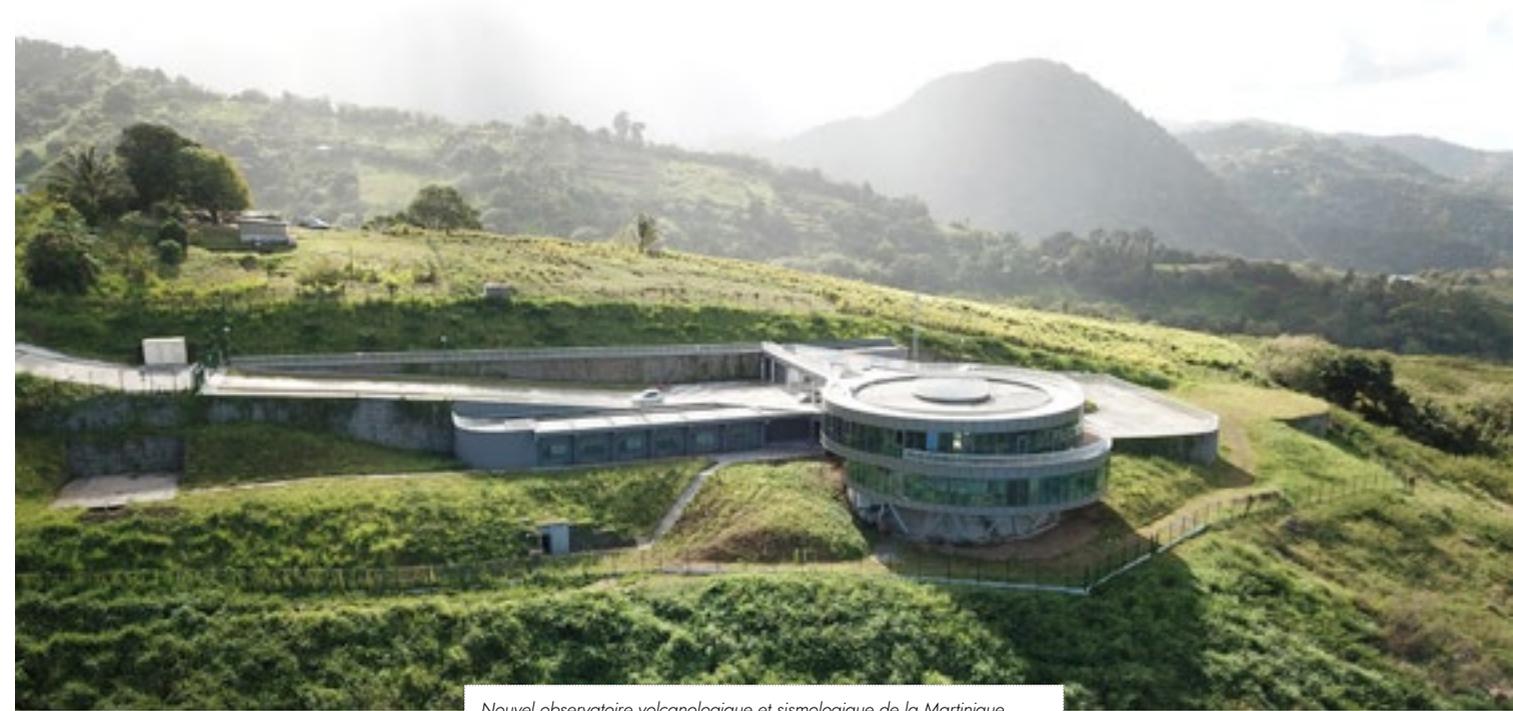
- L'année 2018 a été une année d'activité remarquable à la Soufrière de Guadeloupe (voir focus page 76).
- En Martinique, au cours du premier trimestre 2018, environ 1 000 événements sismiques ont été identifiés comme des effondrements de la falaise Samperre, à la source de la rivière du Prêcheur. Ils représentent un volume total de plus de 5 millions de mètres cubes de matériaux remobilisés par plus de 200 lahars en 2018, menaçant les populations près de la rive du village de Prêcheur. Ainsi, des évacuations ont été régulièrement ordonnées. Les lahars les plus

- 2018 was a remarkable year in terms of activity at the Soufrière of Guadeloupe (see focus page 76).
- In Martinique, during the first quarter of 2018, around 1,000 seismic events were identified as « Sampère » cliff rockfalls, at the headwaters of the Prêcheur river. They represent a total volume of more than 5 millions cubic meter of material that was transported by numerous lahars and hyper-concentrated stream flow all along the period (more than 200 flow episodes) thus threatening the population near the river bank in the Prêcheur village. Evacuations were regularly ordered. The alert system designed and maintained by the observatory of Martinique since 2001 was damaged several times.

intenses ont endommagé le système d'alerte conçu et maintenu par l'OVSM depuis 2001.

- L'année 2018 fut une nouvelle fois très active au Piton de La Fournaise avec quatre éruptions situées dans l'Enclos Fouqué. Un total de 83 jours d'éruption a demandé la mise en place d'astreintes renforcées pendant environ 1500 heures. À l'échelle de l'île de la Réunion, si l'on exclut le Piton de la Fournaise, la plupart des séismes locaux se situent sous le massif de la « Roche Écrite » et trois séismes ressentis se sont produits au sud de Saint-Denis. Depuis le 10 mai 2018, la région sous-marine à l'est de Mayotte est le lieu d'une séquence sismique ininterrompue et sans précédent dans la région. Localisée à 35-60 km à l'est de Mamoudzou, cette crise s'est caractérisée par plus de 30 séismes de magnitude supérieure ou égale à 5.0, dont un choc important de magnitude Mw 5.9 le 15 mai 2018. Le 11 novembre 2018, un signal très longue période et monochromatique a été enregistré par les réseaux large bande mondiaux. L'analyse et la modélisation des enregistrements de six stations GNSS installées sur l'île de Mayotte montrent que des mouvements du sol sont associés à des événements réguliers et forts depuis la mi-juillet. Depuis le début de la crise, le mouvement d'ensemble des sites GNSS est de près de 10 cm vers l'est et 6 cm de subsidence. Les équipes des observatoires volcanologiques de Paris et de la Réunion ont participé au suivi de la crise pendant l'été. Ils ont également aidé et conseillé le BRGM en matière d'expertise scientifique.
- Les observatoires fournissent des bulletins d'information sur l'activité volcanique et la sismicité à la population, aux autorités et aux médias, ainsi que sur les réseaux sociaux (OVSG : mensuel et pour chaque essaim sismique volcanique à compter de novembre 2018 ; OVPF : mensuel et quotidien ; OVSM : trimestriel). L'année dernière, les observatoires de Guadeloupe et Martinique ont identifié 2205 événements sismiques et en ont localisés 1376 dans l'arc antillais. 25 bulletins liés à des séismes ressentis ont été

- The year 2018 was once again very active at the Piton de La Fournaise with 4 eruptions that remained located inside the "Enclos-Fouqué" caldera. A total of 83 days of eruption in 2018 resulted in 1,500 hours of extra-work for scientists on-call. At the scale of the island of La Reunion, if one excludes the Piton de la Fournaise, most of the local earthquakes are located under the "Roche Écrite" massif and three out of seven felt earthquakes were located south of Saint-Denis. The submarine region to the east of Mayotte has been the center of an uninterrupted and unprecedented seismic sequence since the 10th of May 2018. Located 35-60 km to the east of Mamoudzou, the crisis was characterized by more than 30 earthquakes of magnitude greater than or equal to 5.0, including a significant shock of magnitude Mw 5.9 on May 15, 2018. On November 11, 2018, a very long period and monochromatic signal was recorded by the global broadband networks. The analysis and modelling of the recordings of six GNSS stations installed on the island of Mayotte revealed ground movements coupled with regular and strong seismic events since mid-July. Basically, the overall movement of GNSS sites has been nearly 10 cm to the east and 6 cm subsidence since the beginning of the crisis. The volcano teams in Paris and La Réunion participated to the monitoring of the crisis in the summer. They also helped and provided advise to BRGM (local scientific experts for the authorities of Mayotte) for scientific expertises.
- Generally speaking, the observatories provide information bulletins on volcanic and seismic activity to the population, authorities and media including in social media (OVSG: Monthly and for each volcanic seismic swarm as of November 2018; OVPF: Monthly and daily; OVSM: quarterly). Last year, the OVSG and OVSM observatories identified 2,205 seismic events and localized 1,376 ones in the West Indies region. 25 felt earthquake bulletins were sent to local authorities in Guadeloupe and Martinique. The September 28th Mw 5.4 sub-



Nouvel observatoire volcanologique et sismologique de la Martinique.
New volcanological and seismological observatory of Martinique © IPGP

envoyés aux autorités locales de Guadeloupe et de Martinique. Le séisme de subduction Mw 5.4 du 28 septembre au large de la Martinique a été largement ressenti dans la région, atteignant une intensité de IV à V. L'observatoire du Piton de la Fournaise a enregistré 9060 événements sismiques, envoyé 114 bulletins d'activité détaillés et exceptionnels, 12 VONA (avis pour l'aviation civile) adressés au VAAC de Toulouse (Centre d'alerte de cendres volcaniques) et 18 alertes concernant l'activité du volcan à destination des autorités locales. L'observatoire de la Réunion a un programme d'échange avec son homologue hawaïen et collabore depuis de nombreuses années avec l'observatoire de la Terre de Singapour et l'observatoire des Comores.

- **L'observatoire volcanologique et sismologique historique de la Martinique a été construit en 1936.** Le nouveau bâtiment, fourni par la collectivité territoriale de Martinique (CTM), devrait être livré au début de 2019. L'IPGP saisit cette occasion unique pour rééquiper les laboratoires de ce nouveau bâtiment et promouvoir une nouvelle plateforme de recherche et de surveillance des sciences de la Terre dans la Caraïbe.

duction earthquake offshore Martinique was largely felt in the region, reaching an intensity of IV to V. The observatory of Piton de la Fournaise has recorded 9,060 seismic events, sent 114 exceptional detailed activity bulletins, 12 VONAs (Volcano Observatory Notice for Aviation) issued to VAAC (Volcanic Ash Advisory Center) and 18 alerts related to the activity of the volcano issues to the local authorities. The observatory of La Réunion has an exchange program with its Hawaiian counterpart and has collaborated with the Earth Observatory of Singapore and the observatory in Comoros for many years. Thus, scientists and engineers have organised regular meetings and collaborative work with their historical partners.

- **The historical volcano observatory of the Martinique was built in 1936.** The new building, provided by the territorial council of Martinique (CTM) is expected to be delivered in early 2019. The IPGP is taking this unique opportunity to install state-of-the-art laboratory equipment in this new building and to promote and foster a new Caribbean research and monitoring platform in Earth sciences.

Centre de données IPGP IPGP Data Center

Le centre de données de l'IPGP (CDIPGP) a pour mission principale la gestion et la mise à disposition pour la communauté scientifique des données géophysiques de l'IPGP. Il est responsable de l'archivage de ces données, leur stockage à long terme (protection renforcée) ainsi que leur diffusion dans des formats et interfaces standards. Il est également en charge du transfert de ces données à des services externes tels que le Réseau sismologique et géodésique français (RESIF) ou l'International Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN).

Le CDIPGP est également responsable de la déclaration des DOI (Digital Object Identifier) associés aux réseaux de données IPGP.

Le CDIPGP gère les données (sismologiques, GNSS, volcanologiques) de 5 réseaux permanents d'observatoires :

- G : GEOSCOPE
- GL : volcanologie et sismologie de la Guadeloupe
- MQ : volcanologie et sismologie de la Martinique
- PF : volcanologie de la Réunion (Piton de la Fournaise)
- WI : réseau sismologique français des Antilles (West Indies).

Le CDIPGP gère également les données de l'instrument SEIS de la mission martienne InSight.

L'équipe du CDIPGP se compose de 5 personnes (un chercheur et 4 ingénieurs, 3.45 ETPT) qui travaillent en étroite collaboration avec les observatoires de l'IPGP, des programmes de recherche tels que InSight, la plateforme S-CAPAD et le service informatique de l'IPGP. L'équipe du CDIPGP fait partie du réseau d'ingénieurs de RESIF.

The main mission of the IPGP Data Center (IPGP-DC) is to manage and to distribute to the scientific community geophysical data from the IPGP. It is responsible for data archiving, long-term curation (enhanced protection) and data distribution through standard formats and interfaces. It is also in charge of relaying data to external services, as the French seismological and geodetic network (RESIF) or the Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN).

IPGP-DC is also responsible for declaring the Digital Object Identifiers (DOIs) associated with the IPGP scientific networks.

IPGP-DC manages the data (seismological, GNSS, volcanological) of 5 permanent networks of observatories:

- G: GEOSCOPE
- GL: volcanology and seismology of Guadeloupe
- MQ: volcanology and seismology of Martinique
- PF: volcanology of Reunion Island (Piton de la Fournaise)
- WI: French West Indies seismological network.

IPGP-DC also manages the data of the SEIS instrument of the Martian InSight mission.

The IPGP-DC team consists of 5 people (a researcher and 4 engineers, 3.45 FTEs), who work in close collaboration with the IPGP observatories, with research programs such as InSight, and with the S-CAPAD platform and the IPGP IT service. The IPGP-DC team is part of the RESIF engineering network.



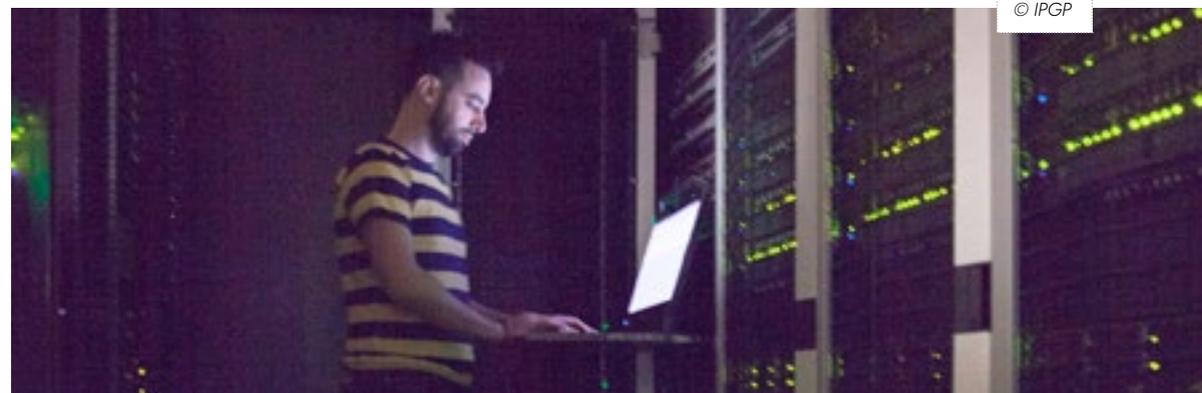
L'équipe du centre de données travaille en étroite collaboration avec les chercheurs, ingénieurs et techniciens des observatoires et du service informatique de l'IPGP. The data center team works closely with researchers, engineers and technicians from the observatories and IT department of the IPGP. © AGU

Réalisations marquantes en 2018 :

- Mise en production des deux services de données de l'instrument SEIS InSight : SEIS Data Portal et Mars SEIS Data Service (en accès restreint) ;
- Implémentation et test de la synchronisation des futures données publiques SEIS avec le Planetary Data System (PDS) et le centre international de données IRIS-DMC ;
- Hébergement du portail publique : (mis en ligne début mai 2018 pour le lancement de la mission) www.seis-insight.eu ;
- Test d'intégration des données volcanologiques (ex. : gaz, inclinométrie, fissurométrie, magnétisme, météo) : les données seront mises à disposition début 2019 via les web services FDSN (<http://ws.ipgp.fr/fdsnws>), le portail volobsis.ipgp.fr et le TCS « VOLCANO OBSERVATIONS » d'EPOS ;
- Réalisation d'un web service pour la mise à disposition de rapports d'activité volcanique (<http://ws.ipgp.fr/volcano-reports>, accès publique prévu fin 2018). Collaboration avec les observatoires volcanologiques dans le cadre d'EPOS, qui finance un ingénieur contractuel ;
- Participation au développement (en cours) d'un outil de contrôle de qualité de données sismologiques. Collaboration avec les observatoires volcanologiques et GEOSCOPE dans le cadre d'un projet RESIF, qui finance un ingénieur contractuel.

Achievements in 2018:

- Release of the two data services for the SEIS InSight instrument: SEIS Data Portal and Mars SEIS Data Service (restricted access only);
- Implementation and testing of the synchronization of future SEIS public data with the Planetary Data System (PDS) and the IRIS international data center (IRIS-DMC);
- Hosting of the public portal: (put online at the beginning of May 2018 for the launch of the mission) www.seis-insight.eu;
- Integration test of volcanological data (e.g., gas, tiltmeters, crackmeters, magnetism, weather): the data will be made available in early 2019 via the FDSN web services (<http://ws.ipgp.fr/fdsnws>), the portal volobsis.ipgp.fr and the EPOS TCS "VOLCANO OBSERVATIONS";
- Development of a web service for the provision of reports of volcanic activity (<http://ws.ipgp.fr/volcano-reports>, public access planned at the end of 2018). Collaboration with volcanological observatories in the framework of EPOS, which finances a contract engineer;
- Participation in the development (in progress) of a quality control tool for seismological data. Collaboration with the volcanological observatories and GEOSCOPE as part of a RESIF project, which finances a contract engineer.



© IPGP

FOCUS



Le 26 avril 2018, le personnel de l'observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe (OVSG-IPGP) a participé à la formation des étudiants en master et des doctorants lors d'un stage de terrain de volcanologie du master STPE/GGG sur les mesures d'extensométrie des fractures.
Staff from the volcanological and seismological observatory of Guadeloupe (OVSG-IPGP) participate on 26 April 2018 in training of masters and PhD students in fracture extensometry measurements during a Volcanology field course of the STPE/GGG Master program. © IPGP/J.C. Komorovski

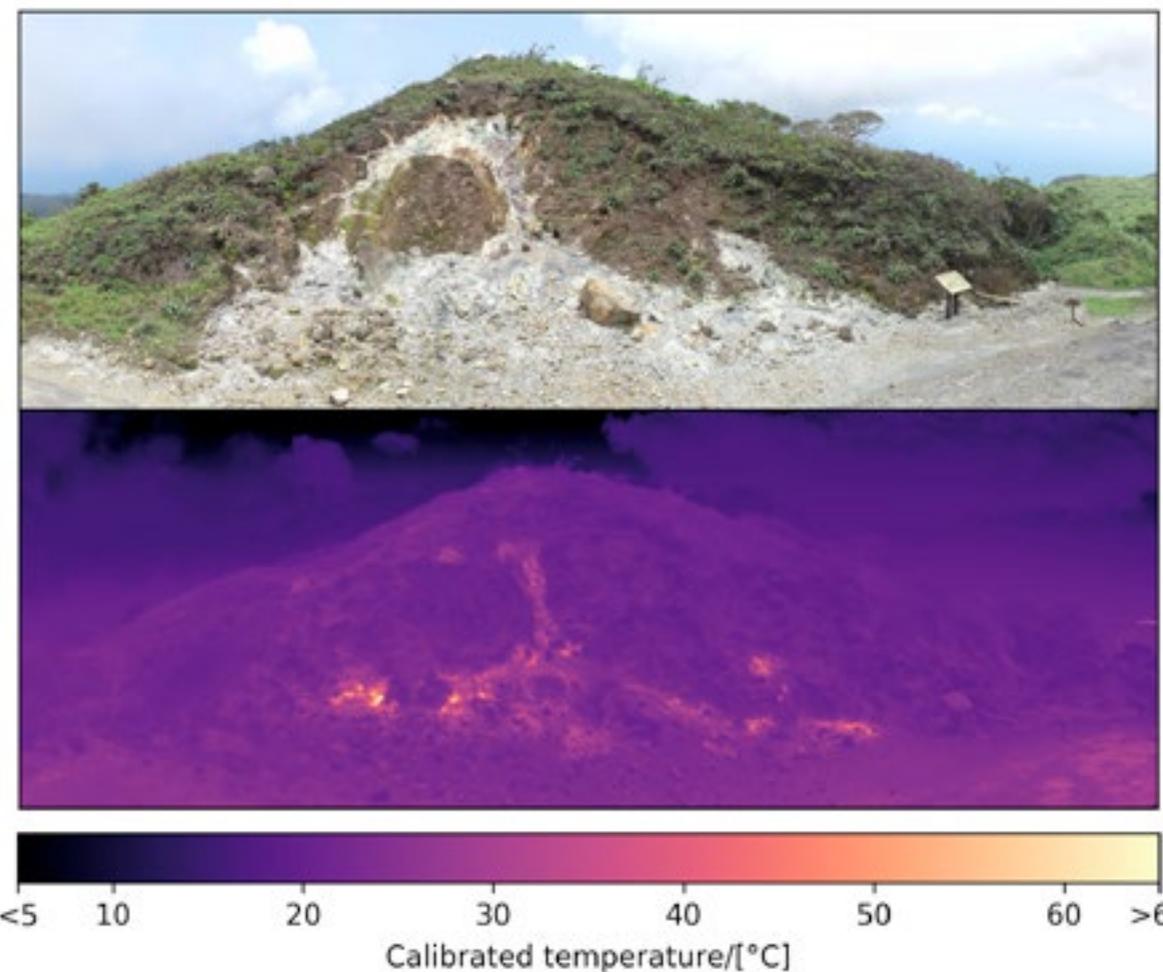
La Soufrière de Guadeloupe, un volcan en phase de réactivation ? The Soufrière of Guadeloupe, a volcano in a state of unrest?

La Soufrière est un volcan en activité qui a connu de nombreuses éruptions magmatiques et non magmatiques par le passé. Son dôme actuel a été formé en 1530 lors de la dernière éruption magmatique majeure. Son activité historique depuis 1635 se caractérise par des éruptions non-magmatiques phréatiques et hydrothermales mineures (1690, 1956) et majeures (1797-1798, 1812, 1836-1837, 1976-1977). La dernière éruption a été particulièrement violente avec 26 explosions majeures entre juillet 1976 et mars 1977. Elle est également considérée comme une éruption magmatique avortée, engendrée par l'intrusion d'un petit volume de magma andésitique qui n'a pas atteint la surface mais aurait stagné à une profondeur de 3 à 4 km. L'intensité de cette crise, le manque de réseaux de surveillance multiparamètres et l'incertitude scientifique quant à son évolution avaient obligé les autorités à évacuer 73 000 personnes pendant six mois.

The Soufrière of Guadeloupe is an active explosive volcano that has experienced many magmatic and non-magmatic eruptions in the past. Its current dome was formed in 1530 CE during the most recent major magmatic eruption. The historical activity of the Soufrière since 1635 CE is characterized by non-magmatic phreatic and hydrothermal eruptions, minor in 1690, and 1956, and major in 1797-1798, 1812, 1836-1837, and 1976-1977. The last eruption was particularly violent with 26 major explosions between July 1976 and March 1977. It is also considered as a failed magmatic eruption caused by the intrusion of a small volume of andesitic magma that did not rise to the surface but stagnated at a shallow depth of 3-4 km below the surface. The intensity of this crisis, lack of multiparameter monitoring networks, and scientific uncertainty about its evolution forced the authorities to evacuate 73,000 people for up to 6 months.

Après la crise de 1976-1977, la sismicité, le dégazage et les flux thermiques ont progressivement diminué pour atteindre, en 1990, leur plus bas niveau depuis le début de la surveillance en 1950. À partir de 1992, l'activité de la Soufrière a augmenté pour atteindre progressivement son niveau d'énergie sismique le plus élevé le 27 avril 2018, avec le plus fort séisme volcano-tectonique (VT) ressenti (Mw 4.1) depuis l'éruption de 1976. De janvier à avril 2018, les fractures au sommet ont continué à s'ouvrir et les anomalies thermiques se sont étendues, avec une augmentation considérable des flux de fumerolles jusqu'au 20 avril.

After this crisis, seismicity, degassing and thermal outputs reduced gradually to their lowest levels in 1990 since the onset of monitoring in 1950. Starting in 1992, the gradual increase of unrest at the Soufrière reached its highest seismic energy level on 27 April 2018, with the largest felt volcano-tectonic (VT) earthquake (Mw 4.1) since the 1976 eruption. Between January and April 2018, summit fractures continued to open and thermal anomalies extended, while fumarole fluxes increased significantly until 20th April.



Surveillance du flux thermique des fumerolles sur la faille de La Ty à la base du dôme de la Soufrière. Monitoring of the thermal flux of fumaroles on the La Ty fault at the base of the dome of the Soufrière.
© OVSG-IPGP/D.Jessop



Personnel de l'OVSG-IPGP prélevant les gaz des fumarolles actives au sommet de la Soufrière : prélèvement à l'aide d'une bouteille remplie de soude Giggenbach pour maximiser les gaz acides condensables dans la solution et maximiser le volume de gaz non condensables dans l'espace de tête de la bouteille, à la fumarolle Napoléon Nord le 20 avril 2018 (A) et Cratère Sud Nord le 5 mai 2018 (B). C : Mesure de la température dans la fumarolle Cratère Sud Central avec la deuxième mesure la plus élevée de 2018, 106,9°C le 17 avril 2018.

Staff from the OVSG-IPGP sampling gases from the active fumaroles at the Summit of the Soufrière: Sampling on with a Giggenbach soda filled bottle to maximize the condensables acid gases in the solution and maximize the volume of uncondensable gases in the flask's head space, at Napoléon North fumarole on 20 April 2018 (A) and Cratère Sud Nord on 05 May 2018 (B). C: Temperature measurement in the Cratère Sud Central fumarole with the second highest measurement of 2018, 106,9°C on 17 April 2018. © IPGP/J-C.Komorovski

Depuis le début de 2018, nous avons observé :

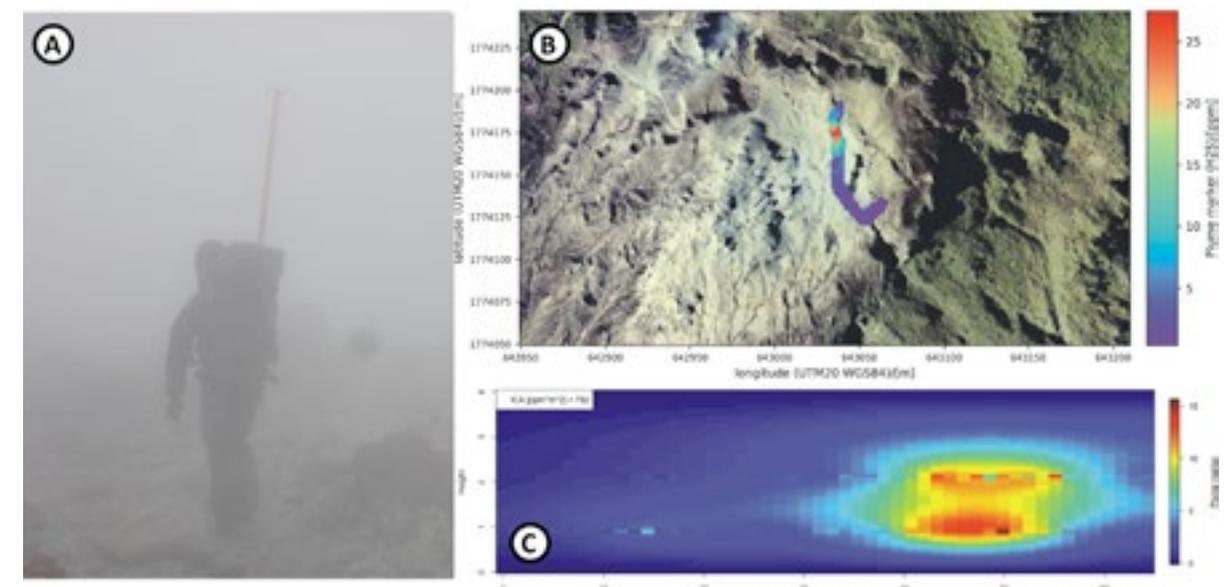
- des perturbations dans la circulation des fluides hydrothermaux ;
- une évolution de l'activité des fumarolles au sommet, lesquelles avaient déjà projeté des boues chaudes et acides en 2016 à quelques mètres de distance ;
- une sismicité volcanique en essaim plus fréquente ;
- davantage de séismes volcaniques ressentis ;
- une déformation du sol de faible amplitude (3-10 mm/an) limitée au dôme et à la poursuite de l'ouverture des fractures du sommet ;

Since the beginning of 2018, we have observed:

- perturbations in hydrothermal fluid circulation;
- evolution in the activity of the summit fumaroles that projected hot and acid mud over a few meters distance in 2016;
- more frequent seismic swarms of volcanic origin;
- more felt volcanic earthquakes;
- low-amplitude ground deformation (3-10 mm/year) limited to the dome and the continued opening of summit fractures;
- fluctuations in fumarolic gas flow rates emitted from an overpressured hydrothermal reservoir;

- des fluctuations des débits de gaz fumeroliens émis par un réservoir hydrothermal sous pression ;
- une propagation des anomalies thermiques au sol sur le sommet du dôme. Ces observations peuvent être expliquées par des injections de gaz magmatique à la base du système hydrothermal à une profondeur comprise entre 2 et 3 km sous le sommet. Cela a donc généré un processus récurrent de chauffage magmatique et de pressurisation du système hydrothermal, bien qu'il n'existe aucune preuve directe d'une remontée de magma. Cette pressurisation des fluides hydrothermaux a déclenché la propagation de fractures dans la roche encaissante, accompagnée de sismicité. Cette activité a modifié les propriétés hydrauliques profondes et généré des voies de drainage, abaissant finalement la pression et les flux fumeroliens en surface entre avril et septembre 2018, avant que les flux atteignent en novembre des valeurs quasi similaires à celles observées le 20 avril 2018. Bien

- propagation of the ground thermal anomalies on the summit of the Soufrière. These observations can be explained by injections of magmatic gas at the base of the hydrothermal system at a depth between 2 and 3 km below the summit. Hence this generated a recurring process of magmatic heating and pressurization of the hydrothermal system, although there is no direct evidence of upward magma migration. This pressurization of hydrothermal fluids triggered propagation of fractures in the host rock associated with seismicity. Such activity likely induced changes in deep hydraulic properties and drainage pathways, ultimately lowering surface fumarolic pressure and fluxes between April and September 2018. As of November, fumarole fluxes have regained elevated values now similar to those observed up to 20 April 2018. Although these magmatic gas injections were modulated by the hydrothermal system during unrest, the unprecedented seismic energy release and critical point conditions of hydrothermal fluids suggest that the ob-



A : Des membres de l'OVSG-IPGP mesurent la concentration en gaz volcaniques dans le panache de la Soufrière lors de relevés pédestres mensuels de 20 minutes à l'aide d'une station MultiGaz mobile. Concentration en H₂S dans le panache du Cratère Sud mesurée par des relevés pédestres (20-07-2018) en vue de carte (B) et en coupe transversale (C) le long du sentier et jusqu'à 4 m au-dessus du sol.

A: Staff from the OVSG-IPGP measuring the concentration of volcanic gases in the plume of the Soufrière during monthly walking 20 minutes surveys with a roving MultiGaz station. H₂S concentration in the gas plume from Cratère Sud as measured in walking surveys (2018-07-20) in map view (B) and in a cross-section (C) along the survey path and up to 4 m above the ground. © IPGP/J-C.Komorovski, data OVSG-IPGP, collaboration INGV



Prise de vue aérienne par drone des fumerolles actives au sommet de la Soufrière, avec les villes de Saint-Claude, Basse-Terre et la mer des Caraïbes en arrière-plan, le 9 septembre 2016.
Aerial drone view of active fumarolic vents at the summit of the Soufrière with the cities of Saint-Claude, Basse-Terre and the Caribbean Sea in the background, on 9 September 2016.
 © OVSG-IPGP, A. Anglade, Parc National de Guadeloupe

que ces injections de gaz magmatiques aient été modulées par le système hydrothermal pendant la réactivation, le dégagement d'énergie sismique sans précédent et les conditions critiques des fluides hydrothermaux suggèrent que cette réactivation peut être considérée comme une éruption phréatique avortée.

La probabilité d'activité éruptive à court terme reste faible. Cependant, il est important de garder à l'esprit que, contrairement aux éruptions magmatiques, les éruptions phréatiques et hydrothermales, qui sont généralement plus fréquentes, sont soudaines avec des signaux précurseurs souvent absents ou peu clairs. Une intensification future de l'activité ne peut pas être exclue. En conséquence, l'OVSG est dans un état de vigilance accrue et a étendu ses réseaux de surveillance de gaz, de déformation, de sismicité et de flux thermique en installant notamment plusieurs nouveaux capteurs résilients de haute résolution, en acquisition temps-réel (finance-

served unrest phase can be regarded as a failed phreatic eruption.

The short-term probability of eruptive activity remains low. However, it is important to bear in mind that, contrary to magmatic eruptions, phreatic and hydrothermal eruptions that are typically more frequent in a volcano's life, are sudden events with often absent or unclear precursory signals. An intensification of the activity in the future cannot be excluded. As a result, the OVSG-IPGP is in a state of increased vigilance and has expanded its networks for gas, deformation, seismic, and thermal flux monitoring with several real-time new high-resolution resilient sensors (funding from INSU SNOV, the IPGP, and the MTES), improved gas sampling and analysis. The OVSG-IPGP considers important to keep a distance of at least 50 m radius from the main centers of fumarolic gas emissions at the summit that are in constant evolution. The OVSG-IPGP has also expanded its protocols for informing the public

ment INSU SNOV, IPGP et MTES) et en améliorant l'échantillonnage et l'analyse des gaz. L'observatoire considère qu'une distance minimale de précaution d'au moins 50 m devrait être maintenue autour des événements actifs en constante évolution au sommet. Il a également étendu ses protocoles d'information pour le public et les autorités, y compris via les réseaux sociaux. À titre de précaution, le 15 janvier 2019, le préfet a étendu la zone d'exclusion au sommet et mis en œuvre de nouvelles règles d'accès. Conformément au plan ORSEC, le niveau actuel d'activité volcanique reste inchangé (VIGILANCE = JAUNE).

and authorities including with social networks. As a precaution, on January 15, 2019 the Prefect has extended the exclusion zone at the summit and implemented new access rules. In accordance with the Plan ORSEC, the current level of volcanic activity (VIGILANCE = YELLOW) remains unchanged.

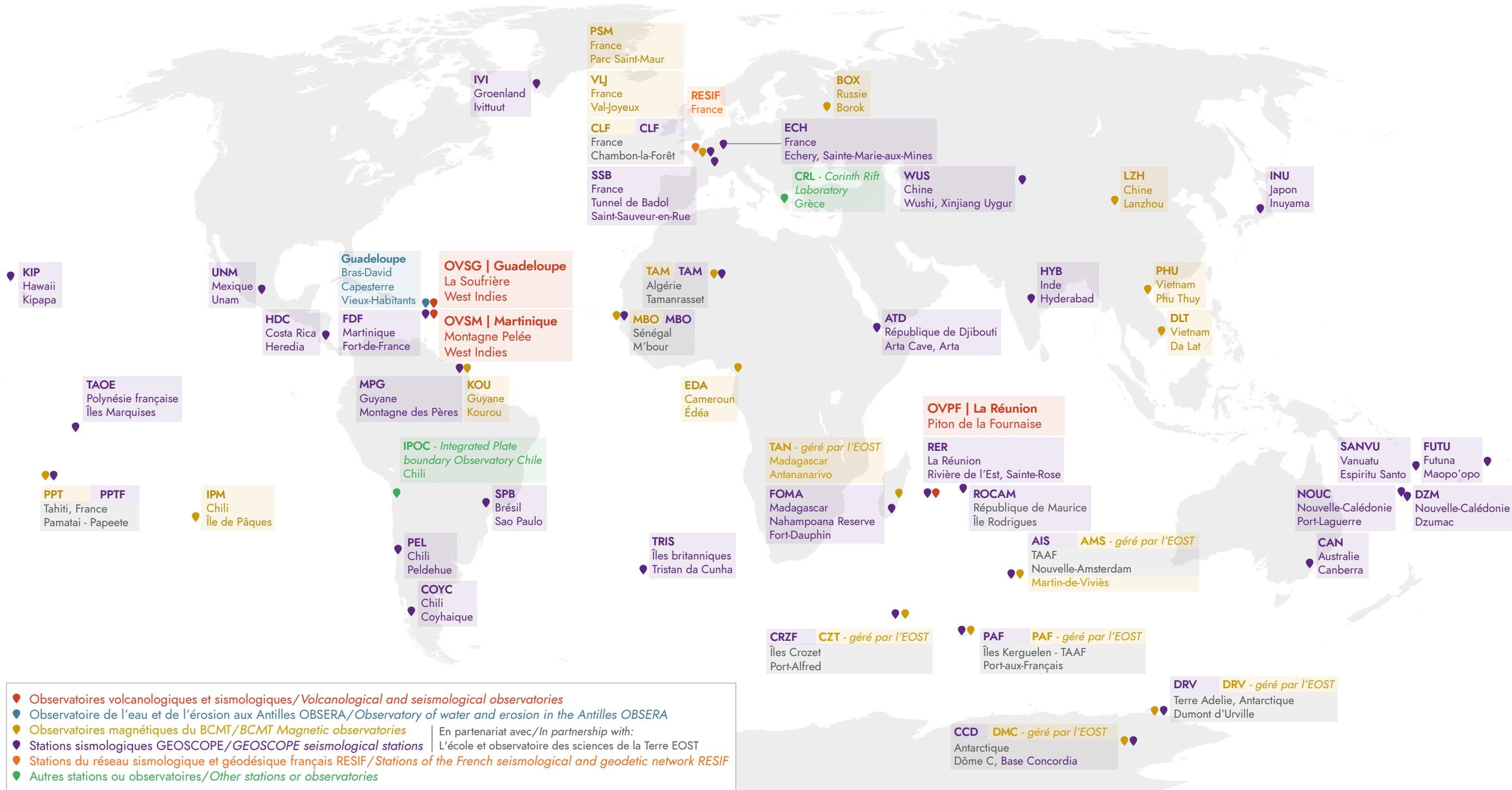
En 2018, le personnel de l'observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe (OVSG-IPGP) modernise la station la plus éloignée de Morne Bontemps, à environ 5 km au nord de la Soufrière avec un nouveau capteur sismique large bande et un récepteur GNSS pour le suivi des déformations.
Staff from the Observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe (OVSG-IPGP) modernize on 2018 the most remote station of Morne Bontemps, about 5 km N of the Soufrière with new broad band seismic sensor and GNSS receiver for deformation monitoring. © OVSG-IPGP



FOCUS

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



Des formations en lien direct avec la recherche et le monde professionnel Courses linked directly to reasearch and professional world

L'institut de physique du globe de Paris offre à ses étudiants des formations en géosciences qui associent observation et analyse quantitative et qui reflètent la qualité, la richesse et la diversité thématique des recherches menées par les équipes de l'IPGP.

En lien direct avec le monde professionnel, ces formations de pointe permettent aux diplômés de l'institut de s'insérer facilement sur le marché du travail et d'y exercer des métiers attractifs, en France ou à l'étranger, dans le monde industriel ou académique.

En tant que grand établissement d'enseignement supérieur et de recherche, l'institut offre des formations de master et de doctorat. Les licences sont délivrées par l'UFR des Sciences de la Terre de l'environnement et des planètes (STEP) de l'université Paris Diderot, aux côtés de laquelle les enseignants-chercheurs, chercheurs et physiciens de l'IPGP s'investissent pleinement afin de soutenir les étudiants au cours de ce premier cycle déterminant.

The Institut de physique du globe de Paris provides its students with geosciences training that combine observation and quantitative analysis, and that reflects the quality, richness and thematic diversity of the research conducted by the IPGP teams.

In direct connection with the professional world, these cutting-edge courses allow the IPGP graduates to easily succeed in the job market and to work in attractive professions, in France or abroad, in industry or academia.

As a major institution for higher education and research, the Institute offers master's and doctoral courses. The undergraduate degrees are granted by the Environmental and Planetary Earth Sciences UFR (teaching and research unit) at the Université Paris Diderot. Alongside this, the lecturers, researchers and physicists from the IPGP are fully committed to supporting this decisive first cycle of studies.



Formation sur le terrain. Field training. © IPGP

Le master comprend deux mentions et sept spécialités, dont six en formation initiale et une exclusivement en alternance, sous contrat d'apprentissage. Par ailleurs, l'ensemble des formations proposées est ouvert à la formation continue.

- Des cours assurés par des enseignants-chercheurs et chercheurs de renommée internationale de l'université Paris Diderot, de l'IPGP, de ses partenaires académiques (ENS, Mines ParisTech, IGN, IFSTTAR, etc.) et du monde de l'entreprise
- Une solide formation de terrain (jusqu'à six semaines de terrain sur l'ensemble de la formation)
- Des formations bénéficiant d'un plateau technique d'exception
- Entre 7 et 11 mois de stage professionnel
- L'adossement des formations aux équipes de recherche et aux observatoires de l'IPGP (160 chercheurs, 130 doctorants) offrant une remarquable diversité dans les activités de recherche en géosciences
- De nombreux partenariats avec de grands groupes industriels de l'exploration et de l'exploitation des ressources naturelles, de la gestion de l'environnement et des géomatériaux.

Des formations ouvertes sur le monde pour une recherche sans frontières **Courses opened to the world, for research without borders**

Le brassage culturel est un facteur essentiel de réussite des étudiants. Environ 20 % des inscrits en master et 30 % des doctorants viennent de pays étrangers, proportions appelées à augmenter de façon significative à l'avenir.

Au fil des années, l'IPGP a développé des collaborations étroites avec des universités étrangères prestigieuses : University of Minnesota (USA), University of São Paulo (Brésil), China University of Geosciences (Chine), University of Western Australia (Australie), École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse), Ludwig Maxi-

The master's degree includes two options and seven specialities, including six as initial studies and one as a study/apprenticeship programme. Moreover, all of the courses on offer are also available as continuing education.

- Classes taught by internationally-renowned researchers and instructors from the Université Paris Diderot, the IPGP, and its academic partners (ENS, MINES ParisTech, IGN, IFSTTAR, etc.), and from the corporate world
- Solid field training (up to six weeks of field work throughout the course)
- Courses with access to exceptional technical resources
- 7 to 11 months of professional placement
- Courses backed by the IPGP's research teams and observatories (160 researchers, 130 doctoral students), offering remarkable diversity in geoscience research activities
- Numerous partnerships with major industrial groups in exploration and exploitation of natural resources, environmental management, and geomaterials.

Cultural exchange is an essential factor in students' success. About 20% of students in master's programmes and 30% of doctoral students come from abroad, and these proportions are expected to substantially increase in the future.

Over the years, the IPGP has developed close collaborations with prestigious universities abroad: University of Minnesota (USA), University of São Paulo (Brazil), China University of Geosciences (China), University of Western Australia (Australia), École polytechnique fédérale de Lausanne (Switzerland), Ludwig Maximilian University of Munich



© IPGP

milian University of Munich (Allemagne), etc. Leurs enseignants visitent l'institut et donnent des cours aux étudiants de second et de troisième cycle.

L'institut poursuit sa politique de développement et de partenariat avec des institutions étrangères, à l'exemple de l'ouverture cette année comme prévu d'un double diplôme avec l'Indian Institute of Education Science and Research de Pune. Un premier étudiant commun a ainsi pu bénéficier d'une bourse d'accueil pour venir étudier à l'IPGP. Par ailleurs, un accord portant sur la création d'un double diplôme de géophysique avec l'université de Freiberg a également été signé.

En tout, ce sont dix étudiants étrangers qui ont pu bénéficier d'une bourse d'accueil pour venir étudier au sein de la spécialité IMSES (International Master in Solid Earth Science, résultant de la fusion du parcours en anglais et de la spécialité Géophysique d'exploration).

(Germany), etc. Instructors from these universities visit the Institute and teach classes for master's and PhD students.

The Institute is continuing its policy of development and partnership with foreign institutions, such as the opening this year as planned of a dual degree with the Indian Institute of Education Science and Research in Pune. A first joint student was thus able to benefit from a host scholarship to study at the IPGP. In addition, an agreement was also signed with the University of Freiberg to create a dual degree in geophysics.

In all, ten foreign students were able to receive a scholarship to study in the IMSES specialisation (International Master in Solid Earth Science, resulting from the merger of the English course and the Exploration Geophysics specialisation).

Études doctorales Doctoral studies



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

The Doctoral Studies Department manages and coordinates all doctoral activities within the IPGP and its Joint Research Unit (UMR 7154). Its main mission is to welcome PhD students and manage their professional life within the institute, from registration to the award of the diploma. For this purpose, it works closely with the STEP'UP Doctoral School (STEP'UP). The Doctoral Studies Department is also actively involved in the animation of the College of Doctoral Studies of the Université Sorbonne Paris Cité (USPC) in order to maintain a permanent interaction between all doctoral schools of this COMUE (community of universities and institutions). This is at this level that policies of consultation, coordination and harmonization of administrative procedures are carried out. Thus, the IPGP participates in allocating resources, developing training programs, improving the success of PhD students and in the international recognition of doctoral schools and the diplomas they award.

© IPGP



© IPGP

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

L'institut de physique du globe de Paris compte en 2018 une centaine de doctorants, dont plus d'un tiers en provenance de pays étrangers. Le service des études doctorales assure les démarches administratives liées à l'obtention des visas et des permis de séjour. En outre, il apporte son soutien chaque année à l'organisation du congrès des doctorants, permettant aux étudiants de la composante Terre-Environnement de l'ED STEP'UP de présenter l'avancée de leurs recherches et d'échanger avec des collègues de tous horizons ainsi qu'avec les chercheurs de l'IPGP et de l'ENS. Indépendamment, le SED propose aussi, sous forme d'appel à projets, une aide à la mobilité internationale en garantissant un soutien financier pour le développement de nouvelles collaborations avec des équipes de recherche du monde entier. Plus d'une quinzaine de doctorants en sont lauréats tous les ans, leur permettant de développer leur réseau professionnel en dehors des circuits traditionnels. Le SED soutient également l'association des doctorants HEKLA ainsi que le réseau d' alumni de l'IPGP (anciens diplômés).

The Doctoral Studies Department is part of the daily life of PhD students by giving them access to all the resources of the IPGP, which will enable them to acquire and maintain a record of excellence in research and by research. These efforts take advantage on the strong and permanent links between STEP'UP and the IPGP members who participate not only in PhD follow-up committees and the registration pedagogical interviews, but also in the selection committee. Thus, the Doctoral Studies Department aligns the IPGP's scientific policy with the selection of future PhD students. It also works to promote doctoral activities and the rapid integration of young researchers into their host scientific teams.

In 2018, the Institut de physique du globe de Paris has about a hundred PhD students, more than a third of whom come from foreign countries. As soon as STEP'UP has selected the future PhD students, the Doctoral Studies Department ensures the administrative procedures related to obtaining visas and residence permits. Every year, the Doctoral Studies Department supports the organization of the PhD Students' Congress, which enables PhD students from the Earth-Environment component of STEP'UP to present the evolution of their research and interact with European colleagues and all the IPGP and ENS researchers. Independently, the Doctoral Studies Department also offers, in the form of a call for projects, International Mobility Grants to provide financial support for the development of new collaborations with research teams around the world. More than 15 PhD students are awarded every year and can thus develop their own scientific networks outside the traditional channels of publications and international congresses. The Doctoral Studies Department also supports the HEKLA PhD students' association and the Alumni network, which includes all former the IPGP post-graduates.

Chiffres clés

Key figures



thèses soutenues en 2018
theses defended in 2018



17



thèses en partenariat industriel
theses in industrial partnership



50/50
parité femmes-hommes
au niveau doctoral
gender parity at doctoral level



nouvelles thèses démarrées en 2018 dont :
13 doctorants étrangers (dont 10 non-européens) et 15 français
16 doctorants issus de masters IPGP et 12 hors formation IPGP
17 femmes et 11 hommes

new theses started in 2018 including:
13 foreign PhD students (including 10 non-European) and 15 French
16 PhD students from IPGP masters courses and 12 outside IPGP training
17 women and 11 men

financements de thèses différents dont :

- 10 contrats du MESRI - Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation
- 2 x 0.5 du CNES - Centre national d'études spatiales
- 0.5 du CEA - Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
- 0.5 de l'ESA - Agence spatiale européenne
- 3 x 0.5 de l'ANR - Agence nationale de la recherche
- 0.5 du BRGM - Bureau de recherches géologiques et minières
- 2 x 0.5 de PREST - Plateforme régionale de surveillance tellurique
- 0.5 de l'IGN - Institut national de l'information géographique et forestière
- 1 ETN - European Training Networks de l'ERC - Conseil européen de la recherche
- 3 du CSC - China Scholarship Council
- 1 de l'IRSN - Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
- 2 x 0.5 du programme MOPGA - Make our planet great again
- 1 de l'ENS - École normale supérieure
- 1 du master international GPX de l'IPGP
- 3 x 0.5 de l'IDEX Université de Paris
- 2 doctorants salariés
- 1 de l'université de Berkeley, Californie, USA

different thesis fundings including:

- 10 contracts from Ministry of Higher Education, Research and Innovation
- 2 x 0.5 of the CNES - National Centre for Space Studies
- 0.5 of the CEA - French Alternative Energies and Atomic Energy Commission
- 0.5 of the ESA - European Space Agency
- 3 x 0.5 from the ANR - National Research Agency
- 0.5 of the BRGM - French geological survey
- 2 x 0.5 of PREST - Regional LBS Platform
- 0.5 of the IGN - Institut national de l'information géographique et forestière
- 1 ETN - European Training Networks of the ERC - European Research Council
- 3 of the CSC - China Scholarship Council
- 1 of the IRSN - Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
- 2 x 0.5 of the MOPGA program - Make our planet great again
- 1 from the ENS - École normale supérieure
- 1 of the IPGP International GPX Master
- 3 x 0.5 from the Université de Paris IDEX
- 2 salaried PhD students
- 1 from the University of Berkeley, California, USA



FOCUS

© IPGP

Congrès des doctorants

PhD student conference

Depuis 25 ans, l'école doctorale STEP'UP tient un congrès des doctorants, rassemblant des étudiants de l'IPGP, de l'université Paris Diderot, de l'ENS, ainsi que des étudiants en géosciences d'autres universités européennes. Chaque année, les doctorants de 1^{ère} année organisent et orchestrent cet événement, l'objectif principal étant d'établir des liens entre les étudiants mais aussi avec des chercheurs et des professionnels de l'industrie.

L'édition 2018, placée sous le thème "From Earth to Mars" a vu la participation de 109 doctorants, dont 15 étrangers venant de Suisse, du Royaume-Uni, de Russie, de République tchèque, d'Italie, d'Allemagne, de Suède, de Norvège et d'Espagne. 61 d'entre eux ont pu présenter l'avancée de leurs travaux de recherche lors de présentations orales dans l'amphithéâtre de l'institut, des sessions posters venant compléter ces discussions.

Comme chaque année, une journée était consacrée à l'emploi avec des conférences, des ateliers et des rencontres avec des acteurs majeurs du monde académique et de la recherche (CEA, Mines ParisTech, BRGM, Max Planck Institute...) et des professionnels (Schlumberger, Apec, Andra, Air Liquide, Kalies...). Le sujet de la conférence finale était quant à lui consacré à la vie sur Mars avec des interventions de scientifiques prestigieux tels que l'astrochimiste Caroline Freissinet et les astrophysiciens François Forget et Francis Rocard.

For 25 years, the STEP'UP Doctoral School has held a PhD Student Conference, congregating students from the IPGP, the Université Paris Diderot and the ENS, as well as invited geoscience students from other European universities. Each year, 1st year PhD students from these institutions organise and orchestrate this conference, the main objective being to bring together and connect fellow PhD students not only with each other, but also with premier researchers and industry professionals.

The 2018 edition, on the theme "From Earth to Mars", was attended by 109 PhD students, including 15 foreigners from Switzerland, the United Kingdom, Russia, the Czech Republic, Italy, Germany, Sweden, Norway and Spain. 61 of them were able to present the progress of their research work during oral presentations in the institute's amphitheatre, with poster sessions to complement these talks.

As every year, a day was devoted to employment with conferences, workshops and meetings with major players from the academic and research world (CEA, Mines ParisTech, BRGM, Max Planck Institute...) and professionals (Schlumberger, Apec, Andra, Air Liquide, Kalies...). The subject of the final conference was devoted to life on Mars with talks by prestigious scientists such as astrochemist Caroline Freissinet and astrophysicists François Forget and Francis Rocard.

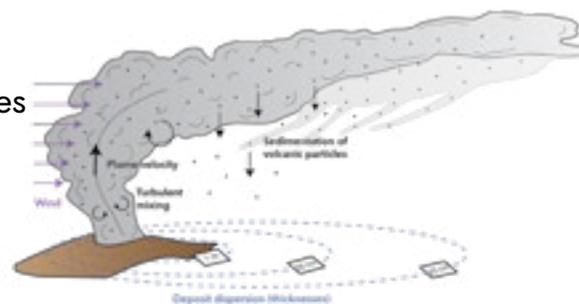


Audrey Michaud-Dubuy

Doctorante en dynamique des fluides géologiques
Geological fluids dynamics PhD student

La montagne Pelée est un des volcans explosifs les plus actifs des Petites Antilles. Au cours des derniers vingt mille ans, le volcan a produit quinze éruptions Pliniennes majeures caractérisées par la projection dans l'atmosphère d'une colonne de gaz et de cendres de plusieurs dizaines de kilomètres de haut dispersant ses fragments volcaniques dans la direction principale des vents. Cette colonne change de régime dynamique en cours d'éruption et s'effondre sous son propre poids, formant des coulées pyroclastiques dévastatrices. L'objectif de ma thèse est d'améliorer notre compréhension de la dynamique de ces éruptions afin de mieux décrire l'aléa volcanique en Martinique.

Les dépôts volcaniques de la montagne Pelée révèlent que ses éruptions ne se différencient que par leur axe de dispersion des produits. Inclure le vent dans nos modèles d'éruption volcanique est donc une priorité. Nous avons ainsi développé des expériences de laboratoire reproduisant une éruption explosive afin de quantifier le forçage du vent sur le mélange entre l'air atmosphérique et la colonne volcanique. Ces résultats permettent d'établir une nouvelle loi de transition entre les deux régimes éruptifs, validée par les données de terrain en Martinique. Cette approche intégrée nous permet également de dresser une nouvelle carte d'aléa volcanique pour la Martinique, prenant en compte pour la première fois les éruptions Pliniennes de la montagne Pelée.



Mount Pelée is one of the most active volcanoes in the Lesser Antilles. In the past twenty thousand years, this volcano has produced fifteen powerful Plinian eruptions propelling a column of hot gas and pyroclasts up to several dozen kilometers in the atmosphere, and spreading particles in the main wind direction. The eruptive regime eventually changes during the eruption, and the column collapses producing destructive pyroclastic density currents. The main goal of my thesis is to improve our knowledge of these eruptions dynamics in order to better assess volcanic hazards in Martinique.

The volcanic deposits of Mount Pelée show that the only difference between its eruptions lies in the dispersal axis of the products. Including the effect of wind in our theoretical models of volcanic eruption is therefore crucial. We have thus developed laboratory experiments reproducing explosive eruptions to quantify the impact of wind stress on the mixing between the atmospheric air and the volcanic column. The results allow us to establish a new transition law between the two eruptive regimes, which we validate with field data from Martinique. Thanks to this combined approach, we have also drawn a new volcanic hazard map for Martinique, including for the first time the Plinian eruptions of Mount Pelée.

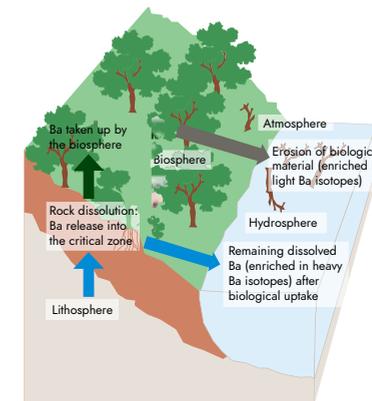


Quentin Charbonnier

Doctorant en géochimie des enveloppes externes
External envelopes geochemistry PhD student

Nous utilisons le comportement des éléments chimiques présents dans les fleuves comme traceurs des interactions complexes se déroulant entre la lithosphère, la biosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère, ce qu'on appelle aujourd'hui la zone critique. La plupart de ces éléments présents dans les eaux de rivières proviennent de l'altération des roches et sont mobilisés au cours de processus chimiques qui consomment le CO₂ atmosphérique et stabilisent le climat à l'échelle des temps géologiques. L'étude de ces flux d'éléments permet de quantifier les paramètres contrôlant l'altération ainsi que la consommation de CO₂ associée. Ils incluent l'érosion, la température ou encore la tectonique. En revanche, le rôle de l'activité biologique (et de la vie en général), même s'il est largement suspecté d'être un facteur déterminant de l'altération des roches, reste relativement occulte.

Le cœur de cette thèse consiste à étudier le cycle isotopique du baryum (Ba) à la surface des continents. Cet élément chimique, essentiel à la vie, est prélevé par la végétation. Lors de ce processus, cette dernière va préférer les isotopes « légers » du Ba, induisant ce qu'on appelle un fractionnement isotopique, mesurable par un spectromètre de masse. Étudier la signature isotopique de cet élément dans les sols, les rivières et la biosphère nous permet d'établir les liens entre altération et productivité biologique et d'identifier le rôle clé de la biosphère dans l'habitabilité de notre planète.



We use the behaviour of the chemical elements present in rivers as tracers of complex interactions between the lithosphere, biosphere, hydrosphere and atmosphere, now called the Critical Zone. Most of these elements present in river waters come from rock alteration and are mobilised through chemical processes that consume atmospheric CO₂ and stabilise the climate on a geological time scale. The study of these element flows makes it possible to quantify the parameters controlling alteration as well as the associated CO₂ consumption. These include erosion, temperature and tectonics. On the other hand, the role of biological activity (and life in general), although widely suspected to be a determining factor in rock alteration, remains relatively unknown.

The core of this thesis is to study the isotopic cycle of barium (Ba) on the surface of continents. This chemical element, essential to life, is collected by vegetation. During this process, vegetation prefers the "light" isotopes of Ba, inducing what is called isotopic fractionation, measurable by a mass spectrometer. By studying the isotopic signature of this element in soils, rivers and the biosphere, we can establish the links between alteration and biological productivity and identify the key role of the biosphere in the habitability of our planet.

Relations internationales

International relationships



Les relations internationales sont par essence transversales, en lien avec l'ensemble des activités de l'institut : la formation, l'observation et la recherche. De ce fait, le bureau des relations internationales permet à l'IPGP d'accroître son influence et son attractivité dans le monde. L'objectif de ce service clé est d'accompagner les chercheurs en les aidant dans le démarrage, la gestion et le rendu de leurs projets scientifiques.

Au cours de l'année 2018, différentes actions ont été menées et des outils ont été améliorés :

- **Organisation de workshops avec des institutions majeures** : l'IPGP a par exemple organisé en décembre 2018 un workshop pré-AGU avec le Los Alamos National Laboratory à Washington DC, afin de faire le point sur les projets de collaboration existants et d'explorer d'autres sujets potentiels de recherche conjointe, tels que le Machine Learning, la surveillance continue des processus actifs, le rôle des fluides et des fractures, la sismologie ionosphérique, etc.
- **Signature de MoU - Memorandum of Understanding (accords de collaboration)** : la plupart des projets mis en œuvre à l'IPGP reposent sur des collaborations internationales mises en place par les chercheurs eux-mêmes, soit de manière individuelle, soit via des MoU ou des accords officiels avec de multiples institutions étrangères. C'est notamment le cas pour l'exploitation et l'entretien des instruments et des réseaux sur le terrain ainsi que pour les échanges d'étudiants et de chercheurs. En complément des MoU renouvelés, de nouveaux accords ont été signés en 2018 avec la Faculty of Engineering & Graduate School of Engineering of Kyoto University (Japon), la China University of Geosciences (CUG, Chine) ou encore l'Institute of Earth Sciences de Taipei (Academia Sinica, Taiwan).
- **Mise en ligne d'une page Web dédiée aux relations internationales sur le site de l'IPGP** : www.ipgp.fr/fr/relations-internationales-a-lipgp

International affairs are, by essence, transverse, and present in most activities of the institute: training, observation and research. Hence the office of international relationships participates to the enhancement of the scientific influence and attractivity of the IPGP in the world. The objective of this key office is to help scientists to make their projects feasible and easier to launch and to manage.

During the last year, different actions have been taken and tools have been improved:

- **Organization of scientific workshops between major institutions**: for example, in december 2018, the IPGP organized a pre-AGU joint workshop between Los Alamos National Laboratory in Washington DC to take stock of existing collaborative projects and to explore potential topics of joint research, such as Machine Learning, continuous monitoring of active processes, roles of fluids and fractures, ionospheric seismology, etc.
- **Signature of MoU - Memorandum of Understanding**: most of the projects at the IPGP are based on international collaborations set up by the researchers themselves, either individually or through MoUs or official agreements with numerous foreign institutions. This is particularly the case for the operation and maintenance of instruments and networks on the field as well as for exchanges of students and researchers. In addition to extensions of previous MoUs, new agreements were signed in 2018 with the Faculty of Engineering & Graduate School of Engineering of Kyoto University (Japan), the China University of Geosciences (CUG, China) or the Institute of Earth Sciences (Academia Sinica, Taipei, Taiwan).
- **Posting of a web page dedicated to international relations on the IPGP website** www.ipgp.fr/en/international-relationships-at-ipgp



Stand IPGP au congrès international AGU en 2018. Academic Showcase at AGU international congress in 2018. © IPGP

- **Bourses MIEM (Mobilité Internationale Entrante Master)** : parmi les multiples actions et outils mis en place pour attirer les meilleurs étudiants étrangers en master et doctorat (distribution de bourses, cours en anglais, etc.), huit bourses annuelles MIEM, financées par l'IDEX Université de Paris, leur ont été distribuées, leur permettant de faire face au coût de la vie et du logement à Paris. Jusqu'à présent, ils contribuent pour un tiers aux thèses préparées à l'IPGP. La mise en œuvre de tous ces dispositifs est coordonnée avec l'université Paris Diderot, notre partenaire naturel (et dans le cadre de l'Université de Paris à l'avenir).
- **Soutien au partenariats internationaux** : le bureau des relations internationales apporte son soutien aux summer schools et aux workshops dans le cadre de la politique de partenariats internationaux à l'IPGP. L'institut a aussi une représentation à l'AGU, plus important congrès international de géosciences. Lors de l'édition 2018, à Washington, le stand de l'IPGP a accueilli plus de 600 visiteurs internationaux.
- **Coordination du programme d'invitation et meilleur accompagnement des professeurs et chercheurs invités ainsi que des étudiants étrangers** : 67 professeurs ou chercheurs internationaux ont été invités au cours de l'année académique 2017-2018 pour une période de minimum un mois.
- **Création du statut de chercheur associé** afin de faciliter des collaborations suivies, sur plusieurs années, entre collègues extérieurs à l'institut et les équipes de recherche de l'IPGP. Ce statut est accordé pour une période de 3 ans, renouvelable, après avis du conseil scientifique.

- **MIEM fellowships**: among the many actions and tools put in place to attract the best foreign students in master's and doctoral studies (distribution of fellowships, courses in English, etc.), eight annual MIEM fellowships, funded by the Université de Paris IDEX, were distributed to foreign students, which enable them to support the cost of living and accommodation in Paris. So far, foreign students contribute for one third to theses prepared at the IPGP. All these measures are coordinated with Université Paris Diderot, our natural partner (and in the future in the framework of the Université de Paris).
- **Support for international partnerships**: the office of international relationships supports summer schools and workshops as part of the IPGP's international partnership policy. The institute also has representation at the AGU, the largest international geosciences congress. During the 2018 edition of the congress in Washington, the IPGP booth welcomed more than 600 international visitors.
- **Coordination of the invitation programme and better support of visiting scientists and foreign students**: 67 international professors or researchers have been invited during the academic year 2017-2018 for at least one month.
- **Creation of the status of associate researcher** to facilitate ongoing collaborations over several years between colleagues from outside the Institute and the IPGP research teams. This status is granted for a period of 3 years, renewable, after consulting the scientific council.

Scientifiques invités 2017-2018

2017-2018 visiting scientists

- **ALLEMAGNE/GERMANY**
BAUDENBACHER Franz
SCHIMMEL Martin
- **CANADA/CANADA**
BIZZARO Martin
HENDERSON Grant
SAINT-ONGE Guillaume
- **JAPON/JAPAN**
HOSONO Takairo
KATO Chizu
KONISHI Kensuke
IDA Shigeru
SUKENAGA Sohei
- **USA/USA**
BEN-ZION Yehuda
DAY James
DRUHAN Jenny
FARQUHAR James
GOLD Ryan
GOLDSTEIN Steve
GONCHAROV Alexander
GRAND Stephen
HUBA Joseph, D.
JOHN Barbara
MANNING Craig
MICHAEL Peter
RADEBAUGH Jani
RYERSON Frederick
SELKIN Peter
SHUSTER David
SPILKER Linda
VALLADARES Cesar
YIN Qingzhu
- **CHILI/CHILE**
CARRIZO Daniel
- **CHINE/CHINA**
CHEN Jiubin
GOA Xin
JIN Lixin
MA Lin
- **MONGOLIE/MONGOLIA**
DAVAASUREN Ganzorig
- **PAYS-BAS/NETHERLANDS**
BLANTER Elena
- **FRANCE/FRANCE**
BECCEL Anne
BRUHAT Lucie
DESCHAMPS Frédéric
ROUMEJON Stéphane
- **PÉROU/PERU**
INZA CALUPPE Adolfo
- **POLOGNE/POLAND**
SZYMCZAK Piotr
- **GRÈCE/GREECE**
SACHPAZI Maria
- **RUSSIE/RUSSIA**
GUDKOVA Tamara
KHOKHLOV Andrei
KISELEV Serguei
KOSSOBOKOV Vladimir
MIKHAILOV Valentin
PAVLOV Vladimir
PODOLSKIY Evgeniy
SHAPOVAL Alexander
SHEBALIN Pieter
SMIRNOV Vladimir
VOROBIEVA Inessa
- **INDONÉSIE/INDONESIA**
SURYANTO Wiwit
- **ISRAËL/ISRAEL**
GRANOT Roi
- **ITALIE/ITALIA**
CARBONE Daniele
FORTE Alessandro
IEZZI Gianluca
RICCI Tullio
- **BRÉSIL/BRAZIL**
TRINDADE Ricardo
- **SUISSE/SWITZERLAND**
EGLI Ramon
WALTER Fabian

Partenariats Partnerships



Les sujets de recherche développés dans le cadre des partenariats de l'IPGP couvrent un large spectre de son expertise scientifique, allant de la géophysique et la géochimie aux sciences de l'environnement et des matériaux. Ces projets sont des moyens efficaces pour former de jeunes étudiants à des carrières académiques ou industrielles.

En 2018, trois nouveaux contrats de partenariat ont été signés avec TOTAL, Lafarge, AXA et EDF. Ces partenariats représentent une implication d'environ 3% des responsables scientifiques de l'institut pour un budget de 900 K€.

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

L'IPGP et la société NanoBactérie ont soutenu, dans le cadre d'un partenariat CIFRE, la thèse de Raphaël Lefèvre visant à augmenter l'activité anti-tumorale de magnétosomes biocompatibles (M-PLL). Lorsque ces derniers sont administrés à des souris suivant un protocole de traitement par hyperthermie magnétique, 50% de souris sont entièrement guéries au bout de cinq semaines contre seulement 20% lorsque des nanoparticules de synthèse chimique sont administrées suivant le même protocole.



article publié dans *Theranostics*,
doi: 10.7150/thno.18927

The research topics developed through the IPGP's partnerships cover a broad spectrum of its scientific expertise, ranging from geophysics and geochemistry to environmental and materials sciences. These projects are effective ways to train young students for academic or industrial careers.

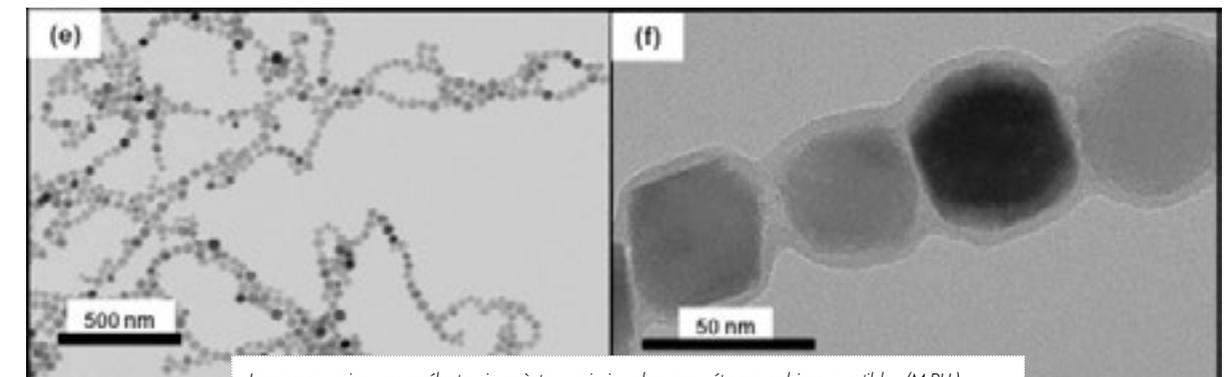
In 2018, three new partnership agreements were signed with TOTAL, Lafarge, AXA and EDF. These partnerships represent an involvement of approximately 3% of the Institute's scientific heads for a budget of €900 K.

Activity in partnership with the industrial sector remained strong and resulted in shared scientific and technical successes.

The IPGP and the company NanoBactérie have supported Raphaël Lefèvre's thesis aiming to increase the anti-tumour activity of biocompatible magnetosomes (M-PLL) as part of a CIFRE partnership. When MPLL are administered to mice following a magnetic hyperthermia treatment protocol, 50% of mice are fully healed after five weeks compared to only 20% when chemical synthesis nanoparticles are administered following the same protocol.



article published in *Theranostics*,
doi: 10.7150/thno.18927



Images au microscope électronique à transmission des magnétosomes biocompatibles (M-PLL).
Images of biocompatible magnetosomes (M-PLL) under the transmission electron microscope. © IPGP



© IPGP

Des chercheurs de l'IPGP et de la manufacture Baccarat ont révélé le rôle du plomb présent dans le « Flint glass », un type de verre correspondant à ceux produits par des fabricants très connus de « l'art de la table » tels que Baccarat. Ces travaux ont démontré que le plomb agissait comme un modificateur de réseau, même à faible teneur. Bien qu'il puisse former des tétraèdres PbO_4 lorsqu'il est présent en grande quantité, on ne peut affirmer que le plomb agisse comme un formateur de réseau à forte teneur en plomb.

→ article publié dans *Chemical Geology*,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.03.030>

Le projet PIONEER (Planetary Instruments based on Optical technologies for an innovative European Exploration Using Rotational Seismology) de l'équipe de planétologie et sciences spatiales (responsable de projet : Sébastien de Raucourt), a été sélectionné dans le cadre d'un appel d'offres H2020. L'objectif de ce projet est de développer un sismomètre optique de nouvelle génération, encore plus performant que le sismomètre SEIS de la mission InSight, qui pourra être proposé pour des futures missions de sismologie planétaire, en particulier sur la Lune. La première innovation est de concevoir un instrument comprenant, en plus des

Researchers from the IPGP and the Baccarat factory have revealed the role of lead in Flint glass, a type of glass like those produced by well-known tableware manufacturers such as Baccarat. Researchers have shown that lead acts as a network modifier, even at low levels. Although it can form PbO_4 tetrahedra when present in large quantities, it cannot be said that lead acts as a network former at high lead content.

→ article published in *Chemical Geology*,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.03.030>

The PIONEER project (Planetary Instruments based on Optical technologies for an innovative European Exploration Using Rotational Seismology) of the Planetology and Space Sciences team (project director: Sébastien de Raucourt), was selected in the H2020 call for tenders. The objective of this project is to develop a new generation optical seismometer, even more efficient than the InSight mission's SEIS seismometer, which could be proposed for future planetary seismology missions, particularly on the Moon. The first innovation is to design an instrument comprising, in addition to the three very broadband translational sensors, three rotation sensors. The second major innovation is to replace the electrostatic displacement detector with

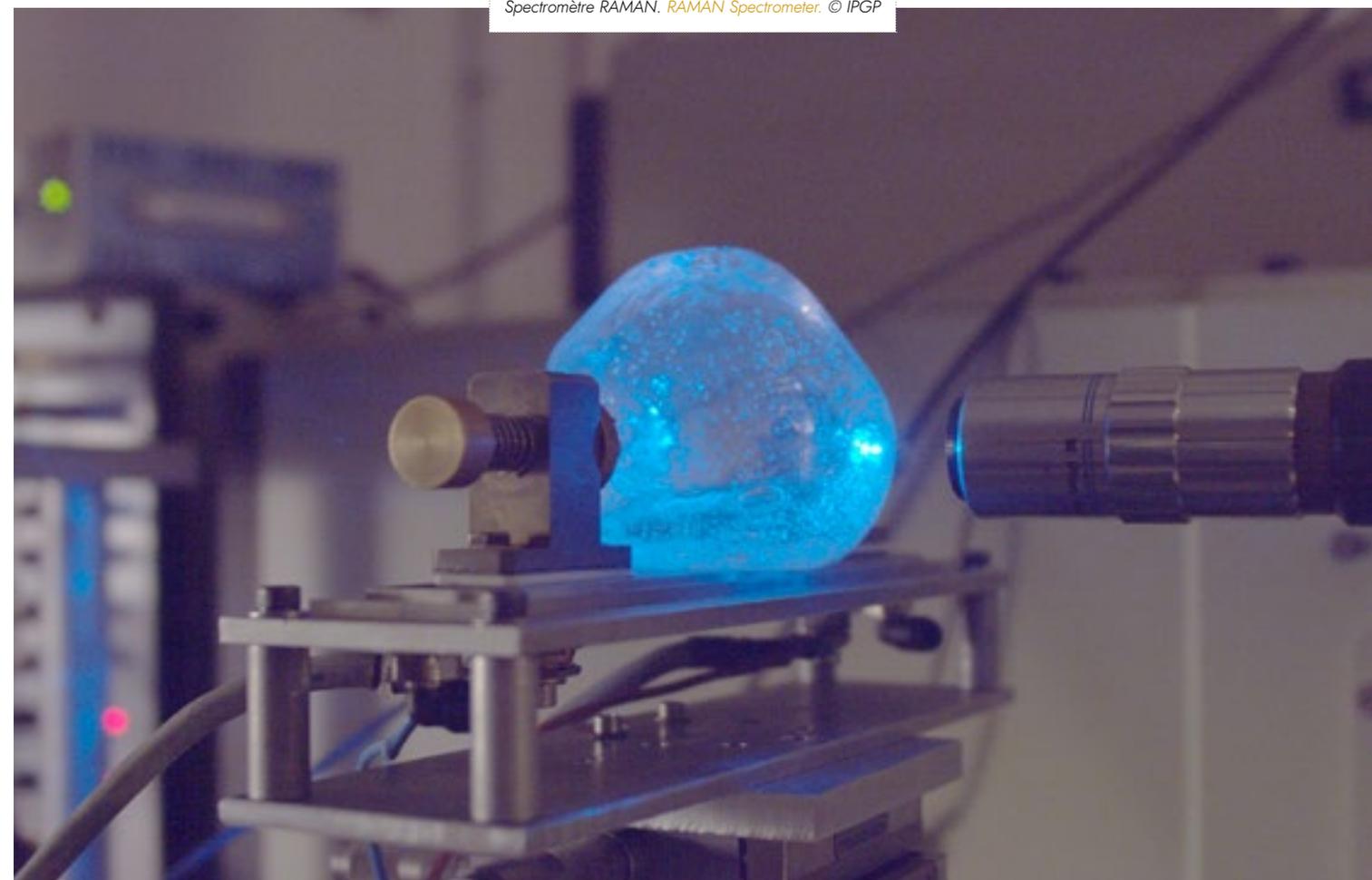
trois capteurs très large bande sensibles aux translations, trois capteurs de rotation. La deuxième innovation majeure est de remplacer le détecteur de déplacement électrostatique par un interféromètre, permettant ainsi d'améliorer la performance et de simplifier l'instrument et son déploiement sur une autre planète.

Le projet PIONEER est mené par un consortium européen mené par l'ISAE et intégrant l'entreprise française iXBlue, ainsi que les laboratoires de recherche Ludwig-Maximilians de l'Université de Munich et l'École polytechnique fédérale de Zurich. Au sein de ce consortium, l'IPGP est en charge du développement du capteur de translation. En association avec iXBlue, qui aura en charge la partie optique et électronique du capteur, l'IPGP devra concevoir et fabriquer l'oscillateur mécanique et intégrera l'ensemble (oscillateur et interféromètre) pour le tester. L'IPGP devra livrer au bout de quatre ans un prototype, suffisamment mature pour être proposé pour une mission spatiale.

an interferometer, thus improving performance and simplifying the instrument and its deployment on another planet.

The PIONEER project is run by a European consortium led by ISAE and including the French company iXBlue, as well as the Ludwig-Maximilians research laboratories at the University of Munich and the Federal Institute of Technology in Zurich. Within this consortium, the IPGP is in charge of developing the translational sensor. In association with iXBlue, which will be in charge of the optical and electronic part of the sensor, the IPGP will design and manufacture the mechanical oscillator and integrate the whole component (oscillator and interferometer) to test it. The IPGP will have to deliver a prototype after four years that is mature enough to be proposed for a space mission.

Spectromètre RAMAN. RAMAN Spectrometer. © IPGP



Vie de l'établissement Institution's life



Visite du Pavillon Curie par les personnels de l'IPGP organisée par l'association « Parcours des sciences », qui organise depuis plusieurs années des visites grand public de l'ancien laboratoire de Marie Curie situé dans la cour de l'institut (où elle mena ses travaux qui lui valurent le prix Nobel de chimie en 1911).

Visit to the Curie Pavilion by the IPGP staff organised by the "Parcours des sciences" association, which for several years has been organising public visits to Marie Curie's former laboratory located in the institute's courtyard (where she carried out her work for which she won the Nobel Prize in Chemistry in 1911).



Colloque Women in science 2018, associé à la journée internationale des femmes et des filles dans les sciences proclamée par l'Assemblée générale des Nations Unies et l'UNESCO.

Women in science 2018 symposium, associated with the International Day of Women and Girls in Science proclaimed by the United Nations General Assembly and UNESCO.

Grandes personnalités féminines du passé dans les sciences et les labos : Leçons pour l'avenir
Women in science and lab girls from the past: Lessons for the future





© IPGP

Réplique de la sonde InSight en LEGO pour promouvoir la mission et faciliter la médiation scientifique.

Replica of the InSight LEGO probe to promote the mission and facilitate scientific mediation.



© IPGP

Visite de Bill Nye « The Science Guy », célèbre animateur TV et vulgarisateur scientifique américain, découvrant l'IPGP à l'occasion du festival international du film scientifique Pariscience.

Visit of Bill Nye "The Science Guy", famous American TV host and science popularizer, discovering the IPGP during the Pariscience International Science Film Festival.



© IPGP

Stand IPGP lors de l'AGU 2018 à Washington.

The IPGP booth at AGU 2018 in Washington.



© IPGP

Conférence de presse de la NASA à la base aérienne de Vandenberg, en Californie, pour le décollage du lanceur Atlas 5 emportant la sonde Mars InSight.

NASA press conference at Vandenberg Air Force Base, California, for the takeoff of the Atlas 5 launcher carrying the Mars InSight probe.



© IPGP

Beaucoup de monde pour l'atterrissage en direct sur Mars de la sonde InSight à la Cité des sciences et de l'industrie à Paris.

Many people for the live landing on Mars of the InSight probe at the Cité des sciences et de l'industrie in Paris.



© IPGP

Fin de la phase de construction du nouvel observatoire volcanologique et sismologique de Martinique.

End of the construction phase of the new volcanological and seismological observatory in Martinique.



© IPGP

Fête de la science 2018 : l'occasion pour le grand public et les scolaires de découvrir l'IPGP à travers des ateliers ludiques et pédagogiques, des visites de laboratoires, des expositions, etc.

Science Festival 2018: the opportunity for the general public and schoolchildren to discover the IPGP through fun and educational workshops, laboratory visits, exhibitions, etc.



© IPGP

Visite de l'OVSG lors des Journées du patrimoine 2018, auxquelles participe chaque année l'équipe de l'observatoire.

Visit of the OVSG during the 2018 Heritage Days, in which the observatory team participates every year.



© IPGP

Journée de visite de l'institut pour les lycéens lauréats du concours national des Olympiades des géosciences organisé par l'académie de Créteil.

Day of visit of the institute for the winning high school students of the national competition of the Geosciences Olympiads organized by the Créteil Academy.



© IPGP

Soirée cuisine du monde de l'association étudiante Hekla.

World Cooking Evening of the Hekla Student Association.



© IPGP

Sapin de Noël 2018 dans le hall de l'institut.

Christmas tree 2018 in the hall of the institute.

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

1 rue Jussieu 75238 Paris cedex 05

www.ipgp.fr

Conception et réalisation graphique

Service communication Medi@terre

mediaterre@ipgp.fr

Rédaction

Personnels de l'IPGP et service communication

Impression

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

Traduction

Personnels de l'IPGP et Shannon Kiernan

Photos et illustrations

Banque d'images IPGP, AGU, A. Anglade, J. Aubert, Caltech, CNRS Photothèque, Q. Charbonnier, C. Dessert, D. Ducros, C. Epitalon, S. Félicité, GSFC, B. Ingalls, INGV, D. Jessop, Y. Kleinefen, J-C. Komorowski, JPL, Labex UnivEarthS, P. Labrot, Y. Lion, Manchu, B. Ménez, A. Michaud-Dubuy, NASA, H. Piraud, T. Pyle, S. Rodriguez, SODERN, Université Paris Diderot, Wikimedia commons

–

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 75238 Paris cedex 05

www.ipgp.fr

Graphic design and production

Medi@terre communication department

mediaterre@ipgp.fr

Drafting

IPGP staff and communication department

Print

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

Translation

The IPGP staff and Shannon Kiernan

Photos and illustrations

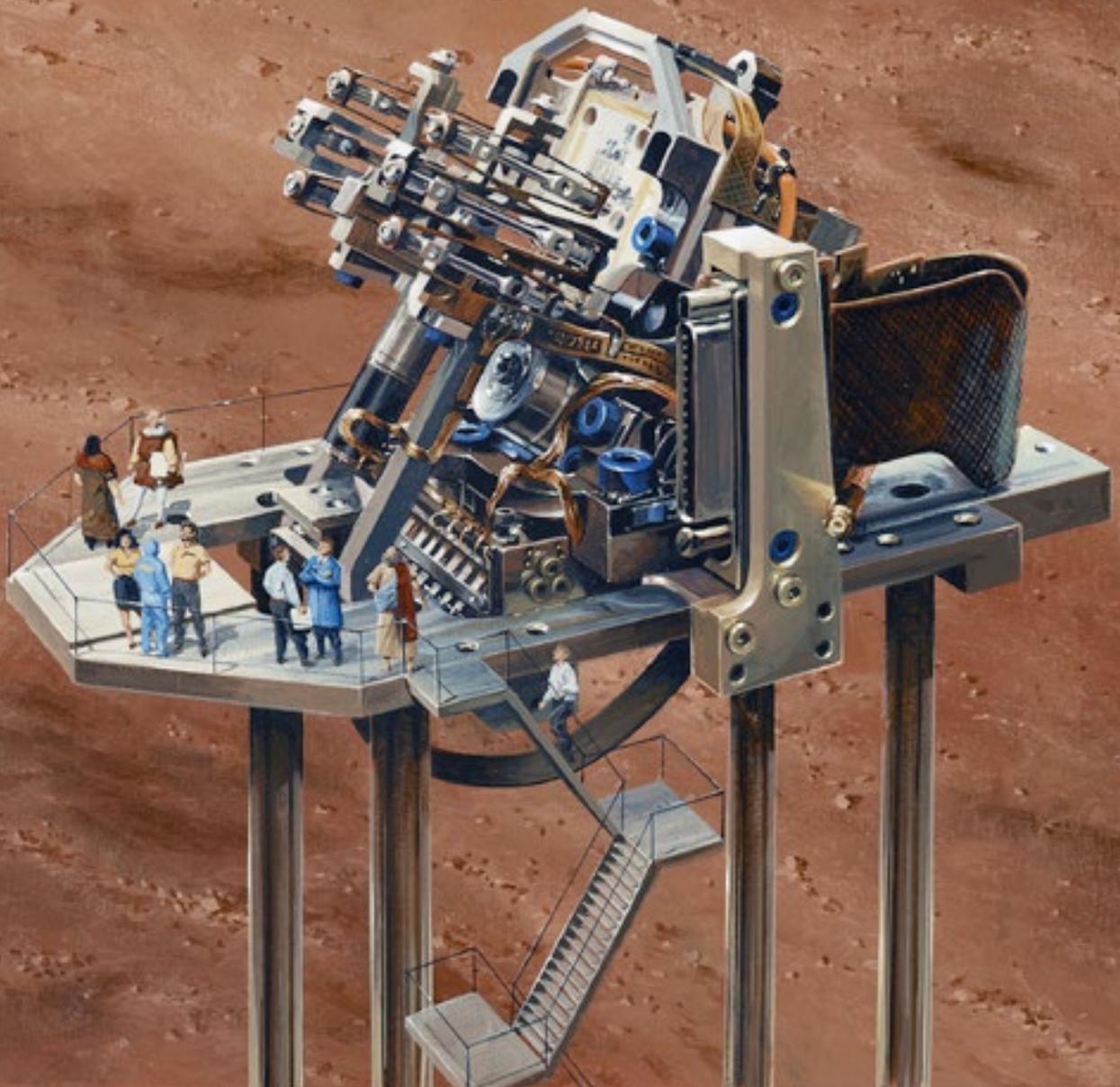
IPGP image database, AGU, A. Anglade, J. Aubert, Caltech, CNRS Photothèque, Q. Charbonnier, C. Dessert, D. Ducros, C. Epitalon, S. Félicité, GSFC, B. Ingalls, INGV, D. Jessop, Y. Kleinefen, J-C. Komorowski, JPL, Labex UnivEarthS, P. Labrot, Y. Lion, Manchu, B. Ménez, A. Michaud-Dubuy, NASA, H. Piraud, T. Pyle, S. Rodriguez, SODERN, Université Paris Diderot, Wikimedia commons

–

THANK YOU !

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





« Le grand pendule ». "The great pendulum". © IPGP/Manchu/Bureau 21

1, rue Jussieu - 75238 Paris cedex 05 - France
Tél.: +33 (0)1 83 95 74 00
www.ipgp.fr  @IPGP_officiel