RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

IPGP
Université Paris Cité

Rapport annuel - Annual report 2021
Institut de physique du globe de Paris

100 ans de sciences pour la planète
100 years of science for the planet

Sommaire
Contents

2 • Entretien avec Marc Chaussidon, Directeur de l'IPGP
Interview with Marc Chaussidon, IPGP Director

5 • Entretien avec Olivier Peyret, Président du CA
Interview with Olivier Peyret, Chairman of the Board of Directors

8 • L'IPGP, 100 ans de sciences pour la planète
The IPGP, 100 years of science for the planet

10 • Focus : Nouveaux instruments
New instruments

14 • Observatoires, thèmes, plateformes et équipes de recherche
Observatories, themes, platforms and research teams

18 • Direction et instances
Management and bodies

20 • Effectifs
Staff

22 • Focus : Dante
Un nouveau supercalculateur pour les sciences de la Terre et de l'Univers
A new supercomputer for Earth and Universe sciences

24 • Chiffres clés
Key figures

26 • Focus : MOOC « Notre Planète »
"Our Planet" MOOC

28 • Vie de la recherche
Research life

38 • Focus : NanoMagSat
Une constellation de nanosatellites pour le suivi et l'étude du champ magnétique terrestre et de l'environnement ionosphérique
A nanosatellite constellation to monitor Earth's magnetic field and ionospheric environment

42 • Prix et distinctions
Awards and honours

45 • Nouveaux chercheurs et enseignants-chercheurs
New researchers and professors

50 • Focus : Interférométrie radar / Radar interferometry
Entretien avec Raphaël Grandin
Interview with Raphaël Grandin

55 • Thèmes IPGP
IPGP themes

55 • Intérieurs de la Terre et des planètes
Earth and Planetary Interiors

63 • Risques naturels
Natural Hazards

71 • Système Terre
Earth System Science

79 • Origines
Origins

87 • Observatoires
Observatories

114 • Dossier spécial
Mission InSight : Mars se dévoile
Special report
InSight mission: Mars unveiled

121 • Enseignement
Teaching

130 • Focus : Coup d'oeil sur deux thèses
Two PhDs at a glance

130 • Christian Laag
132 • Léa Ostoréro

135 • Relations internationales
International relationships

141 • Partenariats
Partnerships

146 • Vie de l'établissement
Institution's life

Entretien avec Marc Chaussidon, Directeur de l'IPGP

Interview with Marc Chaussidon, IPGP Director

2021 représente une étape importante pour l'IPGP puisque notre institut a 100 ans.
Le 28 juillet 1921 était créé par décret un institut de physique du globe au sein de l'université de Paris, avec pour missions de « s'occuper spécialement d'observations et de recherches magnétiques, de créer un enseignement général de la physique du globe avec les sanctions universitaires, et d'être un centre de recherches purement scientifiques ». Ceci est dû en grande partie aux efforts, à la fin de la Première Guerre mondiale, de Charles Maurain (1871-1967), qui fut le premier directeur de l'IPGP de 1921 à 1941. Il sut convaincre de l'importance de fonder un tel institut lors de la réorganisation des services météorologiques, la physique du globe étant depuis 1882 étudiée à l'observatoire de Saint-Maur-des-Fossés, sous l'égide du Bureau central météorologique. En 1990, l'IPGP acquiert le statut de grand établissement, par décret du 21 mars, puis celui d'établissement composante de la nouvelle Université de Paris le 20 mars 2019 (désormais Université Paris Cité).

Lors de sa création, l'IPGP n'employait que 19 personnes et s'occupait essentiellement de conduire des observations et recherches en magnétisme terrestre, sismologie et électricité atmosphérique. Un siècle plus tard, l'établissement abrite plus de 500 personnes sur ses différents sites et intervient, comme le montre ce rapport, dans presque tous les domaines des sciences de la Terre, de l'environnement et des planètes. Près de 300 étudiants suivent les formations de licence et master dispensées par l'IPGP au sein d'Université Paris Cité et une centaine de doctorants développent leurs projets à l'institut.

2021 represents an important milestone for the IPGP since our institute is 100 years old.
On July 28, 1921, an "institut de physique du globe" was created by decree within the university of Paris, with the mission "to deal especially with observations and research in terrestrial magnetism, to create a general teaching of globe physics with university sanctions, and to be a center of purely scientific research". This is largely due to the efforts, at the end of the First World War, of Charles Maurain (1871-1967), who was the first director of the IPGP from 1921 to 1941. He was able to convince of the importance of founding such an institute during the reorganization of the meteorological services, the physics of the globe being studied since 1882 at the Saint-Maur-des-Fossés observatory, within the Central Meteorological Office. In 1990, the IPGP acquired the status of "grand établissement", by decree of March 21, then that of "grand établissement composante" of the new Université de Paris on March 20, 2019 (now Université Paris Cité).

At the time of its creation, the IPGP employed only 19 people and was mainly concerned with conducting observations and research in Earth magnetism, seismology and atmospheric electricity. A century later, the establishment is home to more than 500 people on its various sites and is involved, as this report shows, in almost all fields of Earth, environmental and planetary sciences. Nearly 300 students are enrolled in the IPGP's bachelor's and master's degree programs within Université Paris Cité and about 100 PhD candidates are developing their projects at the institute.

We mark this centenary by celebrating both the rich past of the IPGP and its scientific dynamism today through a book reviewing its history, the discoveries that have been made, and announcing its future projects (publication in 2022), a cycle of exceptional

Équipe de direction 2021 (de gauche à droite et de haut en bas) :

Management team 2021 (from left to right and from top to bottom):

Anne Le Friant,
Marc Chaussidon,
Marc Benedetti,
Gauthier Hulot,
Antoine Charlot,
Arnaud Lemarchand,
Marianne Greff.

Nous marquons ce centenaire en célébrant à la fois le riche passé de l'IPGP et son dynamisme scientifique d'aujourd'hui, à travers un livre revenant sur son histoire, les découvertes qui y ont été faites et qui annonce ses projets futurs (publication courant 2022), un cycle de conférences thématiques exceptionnel, une nouvelle identité visuelle et un site internet entièrement renouvelé (mise en ligne automne 2022). Pour conclure ces festivités, un grand évènement nous rassemblera tous début 2023.

L'année 2021 fut riche en avancées scientifiques et en projets d'envergure, offrant des perspectives et opportunités nouvelles.

Ce rapport présente en particulier des focus sur la découverte de la structure interne de Mars par les sismomètres de la mission InSight, sur l'interférométrie radar dont l'utilisation en tectonique est particulièrement fructueuse, sur le futur des études du champ magnétique terrestre et de l'environnement ionosphérique grâce à la mission à venir NanoMagSat, ou encore sur les nouvelles possibilités offertes par la plateforme DANTE pour le calcul intensif et l'analyse de données. Notons aussi la période « exceptionnelle » traversée par nos observatoires volcanologiques et sismologiques, avec des volcans régulièrement en éruption à La Réunion et à Mayotte, et d'autres en phase de réactivation à la Guadeloupe et à la Martinique.

thematic conferences, a new visual identity, and a completely renewed website (online fall 2022).
To conclude these festivities, a great event will bring us all together in early 2023.

The year 2021 was rich in scientific advances and large-scale projects, offering new perspectives and opportunities.

This report presents in particular the discovery of the internal structure of Mars by the seismometers of the InSight mission, the radar interferometry whose use in tectonics is particularly fruitful, the future of the studies of the Earth's magnetic field and the ionospheric environment thanks to the upcoming NanoMagSat mission, or the new possibilities offered by the DANTE platform for intensive computing and data analysis. Let us also note the "exceptional" period crossed by our volcanological and seismological observatories, with volcanoes regularly erupting in Reunion Island and Mayotte, and others in phase of reactivation in Guadeloupe and Martinique.

At the request of the Board of Directors, the management team, in consultation with the heads of themes, teams, observatories and services, has developed a strategic plan in 2021 with the objective of identifying the major challenges of the IPGP for the next five to ten years in the three areas of research, observation

A la demande du conseil d'administration, l'équipe de direction, en concertation avec les responsables de thèmes, d'équipes, d'observatoires et de services, a élaboré en 2021 un plan stratégique ayant pour objectif d'identifier les grands enjeux de l'IPGP pour les cinq à dix prochaines années dans les trois domaines de la recherche, de l'observation et de l'enseignement. Huit grands enjeux ont été identifiés : former les acteurs en géosciences de demain, revendiquer les thématiques liées à la Terre interne et aux risques naturels telluriques, apporter un regard neuf aux cycles du carbone et de l'eau dans la zone critique, ouvrir l'étude du changement climatique et environnemental aux recherches partenariales, explorer les nouvelles frontières extraterrestres, consolider et développer le spatial, mieux exploiter les données scientifiques, et enfin accompagner les développements instrumentaux et analytiques.

Je ne peux terminer sans avoir une pensée émue pour Giovanni Occhipinti, Ninto pour tous ses collègues et amis, dont la disparition accidentelle, lors de son voyage pour rejoindre sa famille en Sicile pour les fêtes de Noël 2021, nous a tous bouleversés.

En cette année particulière du centenaire de notre institut, je fais le vœu qu'en 2121, quelqu'un puisse rédiger un rapport annuel de l'IPGP et ait, comme cent ans auparavant, l'embarras du choix pour présenter les nombreux progrès scientifiques de l'année.

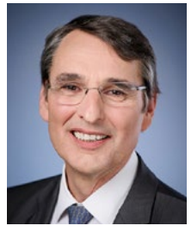
and teaching. Eight major issues have been identified: training the geoscientists of tomorrow, asserting the themes related to the Earth interior and to telluric natural hazards, bringing a new look to the carbon and water cycles in the critical zone, opening the study of climate and environmental change to partnership research, exploring the new extraterrestrial frontiers, consolidating and developing space science, better exploiting scientific data, and finally supporting instrumental and analytical developments.

I cannot finish without having an emotional thought for Giovanni Occhipinti, Ninto for all his colleagues and friends, whose accidental death, during his trip to join his family in Sicily for Christmas 2021, has upset us all.

In this particular year of the centenary of our institute, I wish that in 2121, someone could write an annual report of the IPGP and have, as a hundred years before, the embarrassment of choice to present the many scientific advances of the year.

Entretien avec Olivier Peyret, Président du CA, Président de Schlumberger France

Interview with Olivier Peyret, Chairman of the Board of Directors, Chairman of Schlumberger France



Centenaire et Renaissance

Joyeux 100e anniversaire !

J'imagine que quand on fête son centenaire, au risque de paraître caricatural, on a deux options possibles.

Soit on se tourne d'abord vers le passé, en insistant sur les succès accomplis et les thématiques historiques qui ont construit sa notoriété, en regrettant le bon vieux temps avec une pointe de nostalgie.

Soit on regarde résolument vers le futur, confiant dans sa capacité à relever tous les défis d'aujourd'hui et de demain, fort de son ancrage historique et acteur incontournable de son écosystème, prêt à évoluer avec son temps en se remettant en question régulièrement.

Je formule mes vœux d'anniversaire pour que notre institut embrasse avec ferveur et énergie cette deuxième option.

Les cent prochaines années s'annoncent en effet exigeantes, avec des enjeux sociétaux qui feront appel à de plus en plus de connaissances scientifiques et d'observation de notre planète. Il est aussi critique que nos jeunes générations s'engagent en plus grand nombre dans la compréhension et la maîtrise des sciences, comme autant de clés dans les décisions qu'elles seront amenées à prendre dans les années à venir.

Centennial and Renaissance

Happy 100th birthday!

I imagine that when one celebrates one's centenary, at the risk of appearing caricatural, one has two possible options.

Either you look back to the past, insisting on the successes achieved and the historical themes that have built your reputation, regretting the good old days with a touch of nostalgia.

Or we can look resolutely to the future, confident in our ability to meet all the challenges of today and tomorrow, strengthened by our historical roots and as a key player in our ecosystem, ready to evolve with the times by regularly challenging ourselves.

I would like to wish our institute a happy birthday and hope that it embraces this second option with fervor and energy.

The next hundred years are indeed going to be demanding, with societal issues that will require more and more scientific knowledge and observation of our planet. It is also critical that our younger generations become more involved in understanding and mastering science, as a key to the decisions they will have to make in the years to come.

But will we be able to challenge ourselves to respond to the recent ruptures and the profound transformations that they inevitably bring with them?

Mais saurons-nous nous remettre en question pour répondre aux ruptures récentes et aux transformations profondes qu'elles entraînent inévitablement avec elles ?

Saurons-nous en particulier attirer de plus en plus d'étudiantes et d'étudiants motivés vers les sciences de la Terre ?

Saurons-nous orienter notre recherche vers les thématiques les plus impactantes pour relever les défis planétaires ?

Saurons-nous positionner nos observatoires en plateformes scientifiques expérimentales toujours mieux connectées et ouvertes sur le monde extérieur ?

Notre engagement comme membre fondateur d'Université Paris Cité devrait nous y aider en nous donnant accès à des ressources inédites, dignes des meilleurs établissements mondiaux d'enseignement et de recherche.

Notre connaissance intime et approfondie du globe terrestre et de l'interaction avec son environnement devrait nous donner un coup d'avance dans le choix des solutions à mettre en œuvre.

Reste à mobiliser toutes nos énergies pour construire un destin inspirant dans un monde très dynamique où ne nous sommes pas seuls à vouloir attirer l'attention. Notre succès à l'aube de ce second siècle sera dépendant de notre capacité à changer de braquet, à élargir nos écosystèmes partenariaux, à communiquer au-delà de nos zones de confort.

J'ai la conviction que l'IPGP a toutes les cartes en main pour y parvenir en déployant une stratégie audacieuse qui le rendra encore plus pertinent.

In particular, will we be able to attract more and more motivated students to the Earth sciences?

Will we be able to direct our research towards the most impactful themes to meet global challenges?

Will we be able to position our observatories as experimental scientific platforms that are ever more connected and open to the outside world?

Our commitment as a founding member of Université Paris Cité should help us do this by giving us access to unprecedented resources, worthy of the world's best teaching and research establishments.

Our intimate and in-depth knowledge of the Earth and its interaction with its environment should give us a head start in the choice of solutions to implement.

It remains to mobilize all our energies to build an inspiring destiny in a very dynamic world where we are not alone in wanting to attract attention. Our success at the dawn of this second century will depend on our ability to change gears, to expand our partnership ecosystems, to communicate beyond our comfort zones.

I am convinced that the IPGP has all the cards in hand to achieve this by deploying a bold strategy that will make it even more relevant.

Liste des membres extérieurs du CA
List of external Board members

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

L'IPGP, 100 ans de sciences pour la planète
The IPGP, 100 years of science for the planet

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

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

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

Institut de recherche en géosciences de renommée mondiale, l'IPGP étudie la Terre et les planètes depuis le noyau jusqu'aux enveloppes fluides les plus superficielles, à travers l'observation, l'expérimentation et la modélisation. Une attention toute particulière est portée aux observations de longue durée, essentielles pour l'étude des systèmes naturels. L'IPGP a la charge de services d'observation labellisés en volcanologie, sismologie (terrestre et spatiale), magnétisme, gravimétrie et érosion. L'observatoire de Chambon-la-Forêt (France métropolitaine) assure la mesure continue du champ magnétique terrestre initiée il y a presque un siècle et demi et les observatoires permanents de l'IPGP surveillent les quatre volcans actifs français d'outre-mer en Guadeloupe, en Martinique, à la Réunion et à Mayotte. 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, des plateformes expérimentales et analytiques de dernière génération et bénéficie d'un soutien technique de premier plan. Sa structure souple facilite les interactions entre les 17 équipes de recherche travaillant ensemble sur les quatre grandes thématiques de l'institut : Intérieurs de la Terre et des planètes, Risques naturels, Système Terre et Origines.

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

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

A world-renowned geoscience institute, the IPGP studies the Earth and the planets from the core to the most superficial fluid envelopes, through observation, experimentation and modelling. Special attention is given to long-term observations that are essential for the study of natural systems. The IPGP is in charge of labelled observation services in volcanology, seismology (both terrestrial and spatial), magnetism, gravimetry and erosion. The observatory in Chambon-la-Forêt (metropolitan France) ensures the continuous measurement of the Earth's magnetic field initiated more than 100 years ago and the IPGP's permanent observatories monitor the four active French overseas volcanoes in Guadeloupe, Martinique, Réunion Island and Mayotte. In addition, the IPGP equips and maintains, in partnership with the EOST, two global geophysical networks that monitor magnetic field variations (INTERMAGNET network) and global seismic activity (GEOSCOPE network).

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

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

Nouveaux instruments
New instruments

En complément du renouvellement continu des équipements qui ne sont plus à l'état de l'art, l'IPGP se dote régulièrement de nouveaux instruments de pointe pour répondre à de nouveaux enjeux scientifiques. L'année 2021 ne fait pas exception avec notamment l'acquisition d'un sondeur multifaisceaux à l'OVSM-IPGP et de deux instruments innovants au sein de la plateforme PARI.

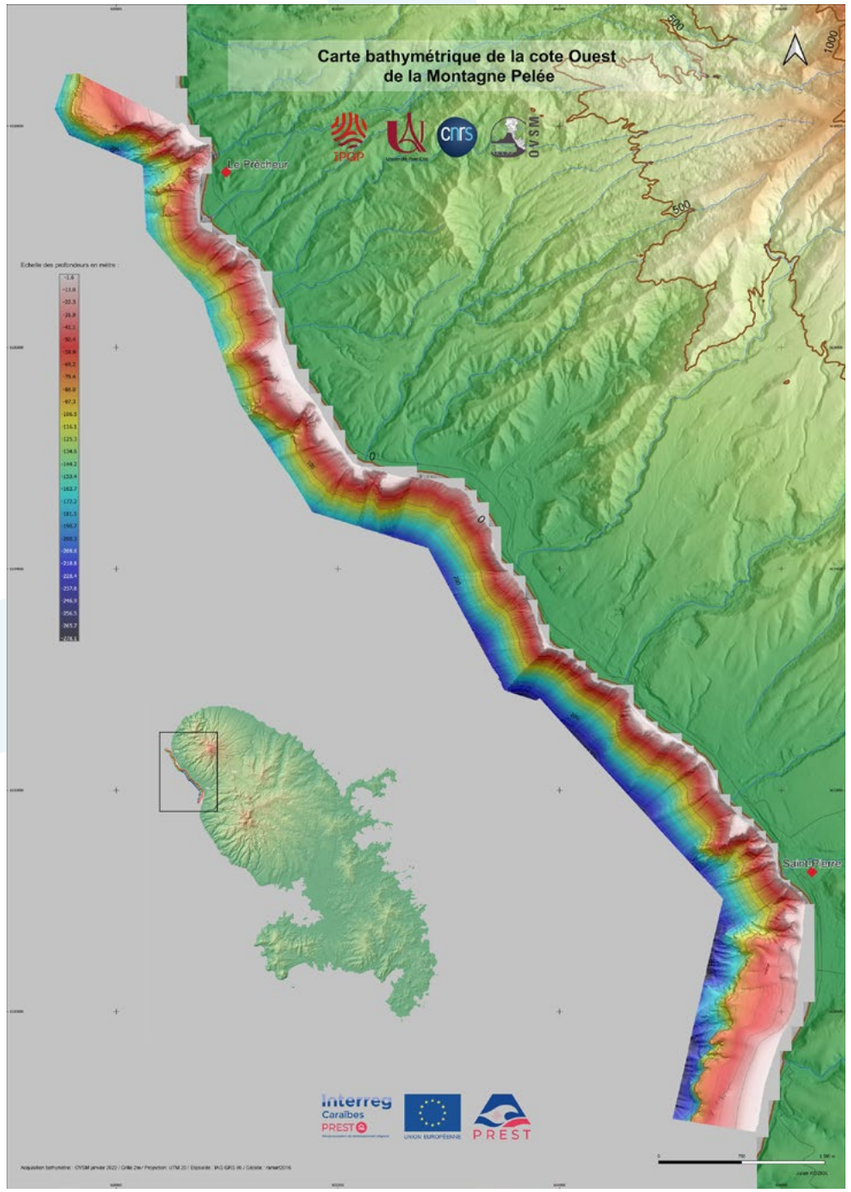
In addition to the continuous renewal of equipment that is no longer state of the art, the IPGP regularly acquires new cutting-edge instruments to meet new scientific challenges. The year 2021 is no exception with the acquisition of a multibeam sounder at the OVSM-IPGP and two innovative instruments within the PARI platform.

Tests en conditions réelles du sondeur multifaisceaux réalisés en Martinique en novembre 2021.
Tests of the multibeam echosounder carried out in Martinique in November 2021.

Sondeur multifaisceaux pour cartographies marines
Multibeam echosounder for marine mapping

Dans le cadre du programme Interreg V Caraïbes et du projet PREST (Plateforme Régionale de Surveillance Tellurique), l'observatoire volcanologique

As part of the Interreg V Caribbean programme and the PREST project (Regional Telluric Monitoring Platform), the Volcanological and Seismological Observatory



et sismologique de Martinique a fait l'acquisition d'un sondeur multifaisceaux en vue de réaliser des cartographies marines en trois dimensions à haute résolution. Cet appareil utilise l'acoustique sous-marine pour réaliser des mesures jusqu'à 300 m de profondeur, tout en étant couplé à un système de positionnement d'une précision centimétrique. Ces données permettront de suivre les apports de sédiments à l'embouchure de la rivière du Prêcheur, liés aux coulées de boues torrentielles (lahars) de cette dernière. L'OVSM-IPGP effectuera également la cartographie détaillée des fonds marins autour de la Montagne Pelée afin de mieux comprendre les structures tectoniques et volcaniques qui s'y trouvent.

of Martinique has acquired a multibeam echosounder to produce high-resolution three-dimensional marine maps. This device uses underwater acoustics to carry out measurements at depths of up to 300 m, while being coupled with a positioning system with centimeter accuracy. These data will help to monitor sediment inputs at the mouth of the Prêcheur River, linked to torrential mudflows (lahars) from the river. The OVSM-IPGP will also carry out detailed mapping of the seabed around the Mount Pelée volcano to enhance our understanding of the tectonic and volcanic structures.

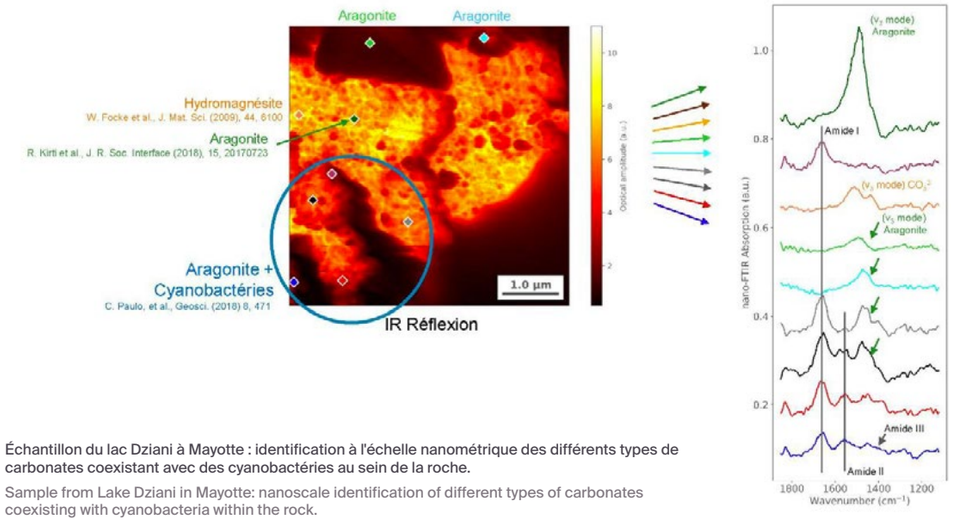
Plateforme d'analyse haute résolution PARI
Plateforme PARI

Déceler des composés organiques au sein des roches, caractériser finement leur hétérogénéité compositionnelle et en déterminer l'origine biologique ou abiotique représentent une série de défis analytiques qui nécessitent, en complément des approches plus traditionnelles comme la spectroscopie Raman ou infrarouge, des instruments de haute résolution spatiale. La plateforme PARI s'est ainsi dotée d'un système combiné de microscopie optique à balayage en champ proche et de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, le neaSNOM (Attocube), permettant l'imagerie et l'identification conjointes de composés organiques et de minéraux à une résolution spatiale de 10 nm. Cet instrument sera un atout de taille pour étudier les liens intimes entre minéraux et matière organique, à travers des questions fondamentales telles que les origines de la vie, l'exploration de la vie microbienne intraterrestre, la biominéralisation ou encore le cycle du carbone profond.

Detecting organic compounds in rocks, characterizing their compositional heterogeneity and determining their biological or abiotic origin represent an analytical challenge that requires, in addition to conventional approaches such as Raman or infrared spectroscopy, high spatial resolution instruments. In 2021, the PARI platform has acquired a combined near-field scanning optical microscope and Fourier transform infrared spectroscopy system, the neaSNOM (Attocube), which allows the joint imaging and identification of organic compounds and minerals at a spatial resolution of 10 nm. This instrument will be a great asset to study the intimate links between minerals and organic matter and address questions related to the origin of life, the exploration of intra terrestrial microbial life, biomineralization processes or the deep carbon cycle.

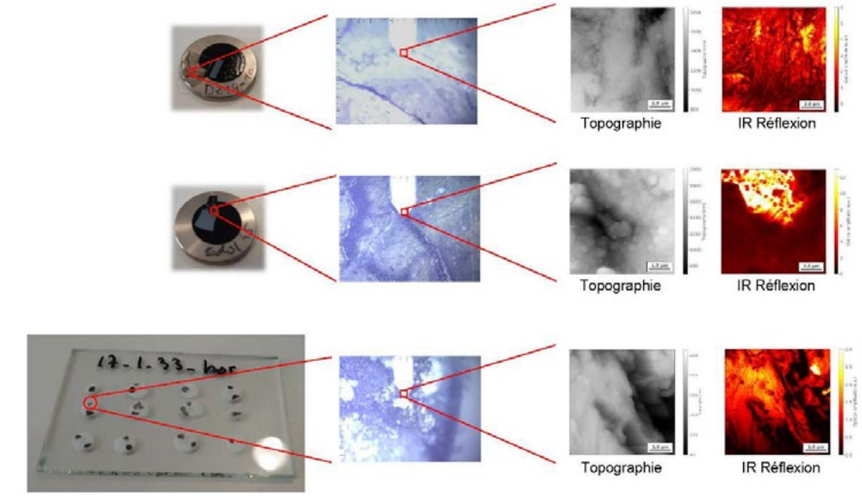
PARI a également fait l'acquisition d'un ICP-MS en temps de vol (ToF), capable de déterminer individuellement le spectre en masse complet des nanoparticules (NPs), ces objets très réactifs disséminés massivement dans les milieux naturels et dont l'impact sur la zone critique reste à quantifier, en vue de faciliter leur identification et mieux comprendre leur origine et leurs transformations.

PARI has also acquired a time-of-flight (ToF) ICP-MS, capable of individually determining the full mass spectrum of nanoparticles (NPs), these highly reactive objects that are massively disseminated in natural environments and whose impact on the critical zone remains to be quantified, in order to facilitate their identification and better understand their origin and transformations.



Échantillon du lac Dziani à Mayotte : identification à l'échelle nanométrique des différents types de carbonates coexistant avec des cyanobactéries au sein de la roche.

Sample from Lake Dziani in Mayotte: nanoscale identification of different types of carbonates coexisting with cyanobacteria within the rock.



1ère ligne : échantillon du lac Dziani à Mayotte (E. Gérard).
2e ligne : échantillon de la ride indienne (B. Ménez).
3e ligne : échantillon du site d'Hellishiedi en Islande (H. Bouquerel).

1st line: sample from Lake Dziani in Mayotte (E. Gérard).
2nd line: sample from the Indian rift (B. Ménez).
3rd line: sample from the Hellishiedi site in Iceland (H. Bouquerel).

Observatoires, thèmes, plateformes et équipes de recherche
Observatories, themes, platforms and research teams

Observatoires
Observatories

Observatoires volcanologiques et sismologiques
Jean-Christophe Komorowski, Responsable scientifique
Jean-Marie Saurel, Responsable opérationnel

Volcanological and Seismological Observatories
Jean-Christophe Komorowski, Scientific Manager
Jean-Marie Saurel, Operational Manager

- **OVSM : Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique**
  Fabrice R. Fontaine
  — Volcanological and Seismological Observatory of Martinique
  Fabrice R. Fontaine
- **OVSG : Observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe**
  Ivan Vlastelic
  en remplacement de Roberto Moretti depuis le 01/08/22
  — Volcanological and Seismological Observatory of Guadeloupe
  Ivan Vlastelic
  replacing Roberto Moretti since 01/08/22
- **OVPF : Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise**
  Aline Peltier
  — Volcanological Observatory of Piton de la Fournaise
  Aline Peltier
- **REVOSIMA : Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte**
  Aline Peltier
  — Volcanological and seismological monitoring network of Mayotte
  Aline Peltier

Observatoires magnétiques
Vincent Lesur
— Magnetic Observatories
Vincent Lesur

Observatoire GEOSCOPE
Martin Vallée, Responsable scientifique
Nicolas Leroy, Responsable technique
— GEOSCOPE Observatory
Martin Vallée, Scientific Manager
Nicolas Leroy, Technical Manager

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

Centre de données IPGP
Claudio Satriano, Responsable scientifique
Constanza Pardo, Responsable technique
— IPGP Data Center
Claudio Satriano, Scientific Manager
Constanza Pardo, Technical Manager

Observatoire InSight
Philippe Lognonné
— InSight Observatory
Philippe Lognonné

Thèmes
Themes

Intérieurs de la Terre et des planètes
Cécile Prigent
James Badro
— Earth and Planetary Interiors
Cécile Prigent
James Badro

Risques naturels
Martine Simoes
François Beauducel
— Natural Hazards
Martine Simoes
François Beauducel

Système Terre
Julien Bouchez
Stéphane Jacquemoud
— Earth System Science
Julien Bouchez
Stéphane Jacquemoud

Origines
Bénédicte Ménez
Frédéric Moynier
— Origins
Bénédicte Ménez
Frédéric Moynier

Plateformes et services communs
Platforms and shared services

Plateau d'analyse haute résolution (PARI)
Catherine Chauvel, Responsable scientifique
Mickaël Tharaud, Responsable technique
— High-Resolution Analysis Platform
Catherine Chauvel, Scientific Manager
Mickaël Tharaud, Technical Manager

Service de calcul parallèle et de traitement de données en sciences de la Terre (S-CAPAD)
Alexandre Fournier, Responsable scientifique
Geneviève Moguilny, Responsable technique
— Parallel Computing and Data Analysis Platform for Earth Science
Alexandre Fournier, Scientific Manager
Geneviève Moguilny, Technical Manager

Lithothèque marine
Cécile Prigent, Responsable scientifique
— Marine Rock Repository
Cécile Prigent, Scientific Manager

Pôle drones
Sébastien Bonaimé
— Drones Unit
Sébastien Bonaimé

Service mutualisé de virtualisation
Michel Le Cocq
— Shared virtualisation service
Michel Le Cocq

Infrastructures nationales hébergées
National hosted infrastructures

- **Parc de sismomètres « fond de mer » INSU-IPGP**
  Wayne Crawford, Responsable scientifique
  Romuald Daniel, Responsable technique
- **Centre de coordination et de diffusion de ForM@Ter**
  Michel Diament
- **OZCAR (Observatoires de la zone critique, applications et recherche)**
  Jérôme Gaillardet

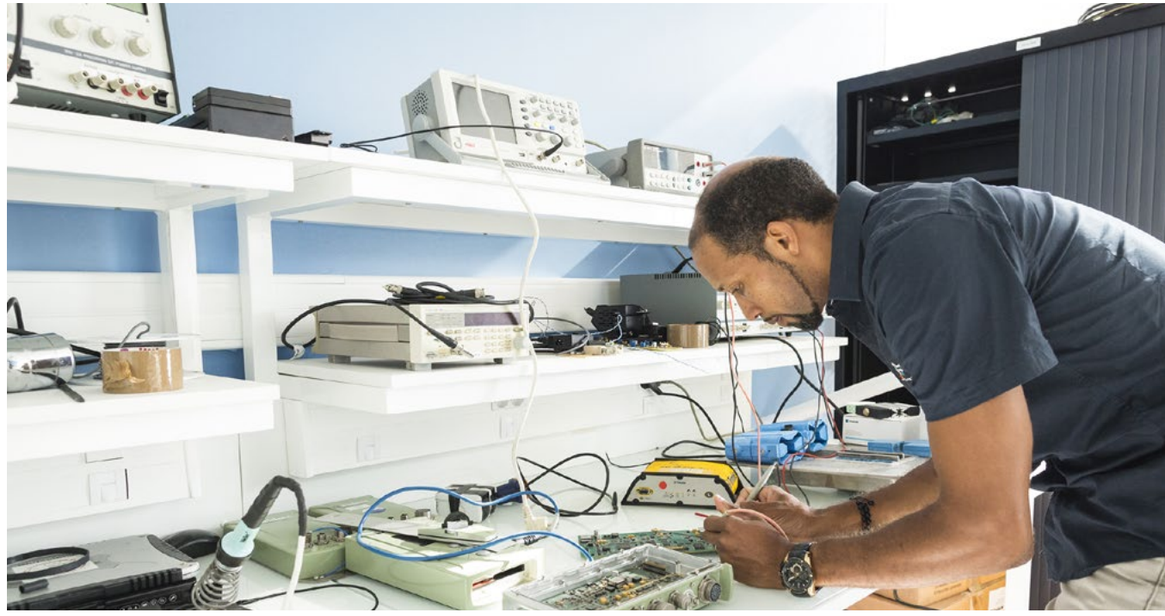
- INSU-IPGP Ocean-Bottom Seismometers (OBS)
  Wayne Crawford, Scientific Manager
  Romuald Daniel, Technical Manager
- Center of Coordination and Distribution of ForM@Ter
  Michel Diament
- OZCAR (Critical Zone Observatories, Applications and Research)
  Jérôme Gaillardet

Équipes
Teams

- **Biogéochimie environnementale**
  Rémi Losno
- **Biogéochimie à l'Anthropocène des éléments et contaminants émergents (ACE)**
  Yann Sivry
- **Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale**
  Julien Siebert
- **Dynamique des fluides géologiques**
  Olivier Devauchelle
- **Géochimie des enveloppes externes**
  Jérôme Gaillardet
- **Géochimie des isotopes stables**
  Magali Ader
- **Géomagnétisme**
  Thomas Gastine

- Environmental Biogeochemistry
  Rémi Losno
- Biogeochemistry at the Antropocene of Elements and Emerging Contaminants
  Yann Sivry
- Cosmochemistry, Astrophysics and Experimental Geophysics
  Julien Siebert
- Geological Fluid Dynamics
  Olivier Devauchelle
- External Envelopes Geochemistry
  Jérôme Gaillardet
- Stable Isotope Geochemistry
  Magali Ader
- Geomagnetism
  Thomas Gastine

Observatoires, thèmes, plateformes et équipes de recherche Observatories, themes, platforms and research teams



- **Géomatériaux**
  Daniel Neuville
- **Géomicrobiologie**
  Alexandre Gélabert
- **Géosciences marines**
  Nathalie Feuillet
- **Géodésie**
  Isabelle Panet
- **Paléomagnétisme**
  Frédéric Fluteau
- **Physique des sites naturels**
  Frédéric Girault
- **Planétologie et sciences spatiales**
  Cécile Ferrari
- **Sismologie**
  Jean-Philippe Metaxian
- **Systèmes volcaniques**
  Jean-Christophe Komorowski
- **Tectonique et mécanique de la lithosphère**
  Yann Klinger

- Geomaterials
  Daniel Neuville
- Geomicrobiology
  Alexandre Gélabert
- Marine Geosciences
  Nathalie Feuillet
- Geodesy
  Isabelle Panet
- Paleomagnetism
  Frédéric Fluteau
- Physics of Natural Sites
  Frédéric Girault
- Planetology and Space Sciences
  Cécile Ferrari
- Seismology
  Jean-Philippe Metaxian
- Volcanic Systems
  Jean-Christophe Komorowski
- Lithosphere Tectonics and Mechanics
  Yann Klinger

Direction et instances
Management and bodies

Marc Chaussidon

Antoine Charlot

Gauthier Hulot

Anne Le Friant

Marianne Greff

Marc Benedetti

Arnaud Lemarchand

L'équipe de direction de l'IPGP se compose du directeur de l'établissement (Marc Chaussidon), du directeur général des services (Antoine Charlot), du directeur adjoint chargé de la recherche et du spatial (Gauthier Hulot), de la directrice adjointe chargée des observatoires (Anne Le Friant), de la directrice adjointe chargée de l'enseignement (Marianne Greff), du directeur adjoint chargé des relations industrielles et internationales (Marc Benedetti) et du directeur adjoint chargé de l'instrumentation (Arnaud Lemarchand).

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

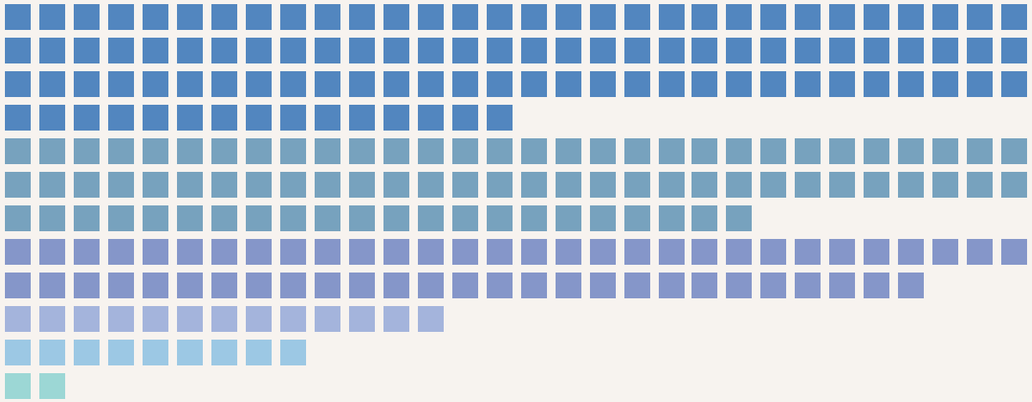
The IPGP's management team includes its director (Marc Chaussidon), the general director of services (Antoine Charlot), the deputy director for research and space activities (Gauthier Hulot), the deputy director for observatories (Anne Le Friant), the deputy director for teaching (Marianne Greff), the deputy director for industrial and international relations (Marc Benedetti) and the deputy director in charge of intrumentation (Arnaud Lemarchand).

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

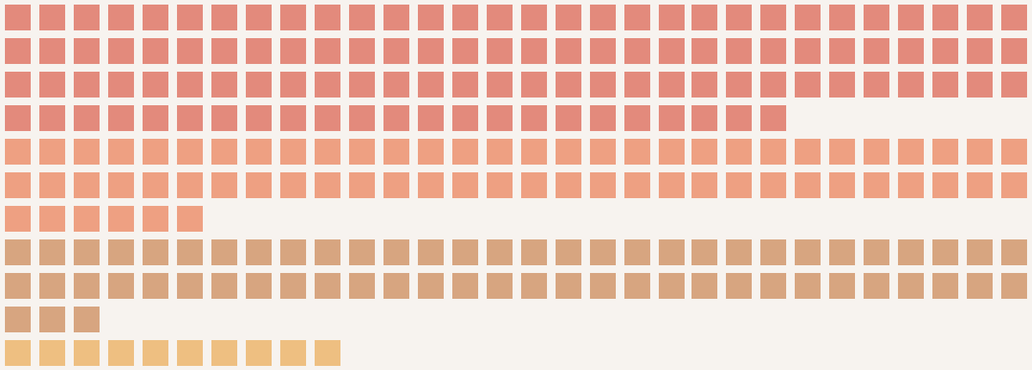
Effectifs
Staff

520 personnels en 2021
staff in 2021

268 permanents
permanent staff



252 non permanents
non-permanent staff



sommaire/contents

105 personnels IPGP IPGP staff
- **1** directeur director
- **1** directeur général des services general director of services
- **7** professeurs professors
- **4** maîtres de conférences senior lecturers
- **17** physiciens CNAP CNAP senior physicists
- **18** physiciens-adjoints CNAP CNAP physicists
- **57** IATSS engineers, technicians, administrative staff

82 personnels CNRS CNRS staff
- **19** directeurs de recherche senior researchers
- **19** chargés de recherche researchers
- **44** ITA engineers, technicians, administrative staff

57 personnels Université Paris Cité Université Paris Cité staff
- **19** professeurs professors
- **27** maîtres de conférences senior lecturers
- **11** IATSS engineers, technicians, administrative staff

13 personnels IGN IGN staff
- **3** directeurs de recherche senior researchers
- **3** chargés de recherche researchers
- **1** assimilé directeur de recherche assimilated senior researcher
- **3** assimilés chargés de recherche assimilated researchers
- **2** enseignants-chercheurs professors
- **1** ingénieur engineer

9 personnels Université de la Réunion University of Reunion Island staff
- **2** professeurs professors
- **4** maîtres de conférences senior lecturers
- **3** IATSS engineers, technicians, administrative staff

2 personnels Collectivité territoriale de Martinique Territorial collectivity of Martinique
- **2** IATSS engineers, technicians, administrative staff

113 doctorants PhD candidates
- **92** doctorants IPGP IPGP PhD candidates
- **20** doctorants Université Paris Cité Université Paris Cité PhD candidates
- **1** doctorant IGN IGN PhD candidate

66 post-doctorants post-doctoral fellows
- **66** post-doctorants IPGP IPGP post-doctoral fellows

63 IATSS engineers, technicians, administrative staff
- **62** personnels IPGP IPGP staff
- **1** personnel Université Paris Cité Université Paris Cité staff

10 ITA engineers, technicians, administrative staff
- **10** personnels CNRS CNRS staff

sommaire/contents

Dante

Un nouveau supercalculateur pour les sciences de la Terre et de l'Univers

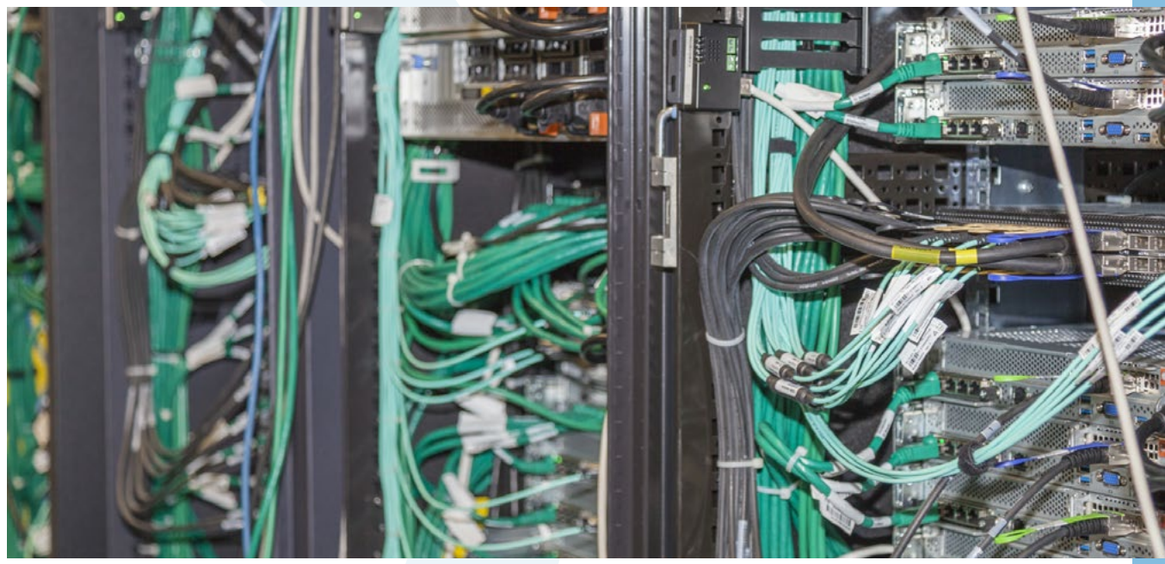
A new supercomputer for Earth and Universe sciences

L'Institut de physique du globe de Paris, le CNRS, Université Paris Cité, la Région Île-de-France et la société Lenovo ont inauguré le 7 octobre 2021 la nouvelle plateforme numérique de calcul intensif et d'analyse de données massives du projet DANTE, qui fédère et mutualise les infrastructures de calcul et d'analyse de données de l'IPGP et du laboratoire APC (CNRS, Université Paris Cité). DANTE (pour multi Data ANalysis and compuTing Environment for science) permet de répondre aux besoins de nombreux projets de recherche et de formation en sciences de la Terre et de l'Univers, et a vocation à s'ouvrir désormais plus largement aux autres disciplines.

Adossé à un stockage sécurisé de longue durée, le super-calculateur Lenovo, financé notamment par le dispositif SESAME de la Région Île-de-France, propose plus de 7000 cœurs sur sa composante calcul parallèle, ainsi que 12 cartes graphiques de dernière génération, qui serviront notamment au prototypage d'algorithmes d'intelligence artificielle.

On 7 October 2021, the IPGP, the CNRS, Université Paris Cité, the Île-de-France regional authorities and Lenovo inaugurated the new digital platform for intensive computing and big data analysis of the DANTE project, which unites and pools the computing and data analysis infrastructures of the IPGP and the APC laboratory (CNRS, Université Paris Cité). DANTE (multi-Data ANalysis and compuTing Environment for science) meets the needs of numerous research and training projects in Earth and Universe sciences, and is also intended to be more widely available to other disciplines.

Supported by secure long-term storage, the Lenovo supercomputer — financed mainly by the Île-de-France Region's SESAME programme — offers more than 7,000 processor cores in its parallel computing component, as well as 12 latest-generation graphics boards, which will be used in particular for prototyping artificial intelligence algorithms.



Véritable banc d'essai d'hypothèses scientifiques, DANTE permet de tester de très grands jeux de données.

Ce mésocentre, ancré au cœur des équipes de recherche, est dimensionné pour offrir des outils de test et de prototypage des expériences numériques, les expériences de très grande échelle pouvant ensuite être menées sur les ressources nationales offertes par GENCI (Grand Équipement National de Calcul Intensif).

Véritable banc d'essai d'hypothèses scientifiques, DANTE permet de tester de très grands jeux de données, que ces dernières soient issues de l'observation ou de modélisations numériques : traitement et analyse des images satellitaires haute résolution ; modélisation par apprentissage machine des propriétés des laves, permettant une meilleure approche de la dynamique éruptive ; ou analyse des données massives en sciences sociales.

« Extraire de l'information de ces données massives permet de tester des hypothèses et de construire et affiner nos modèles » explique Alexandre Fournier, responsable scientifique de la plateforme à l'IPGP. « Cet équipement offre de nouvelles opportunités numériques aux communautés des sciences de la Terre et de l'Univers, qui doivent participer à l'essor de méthodologies nouvelles et à l'avancée de nos connaissances dans ces domaines » conclut-il.

A real test bed for scientific hypotheses, DANTE can test very large datasets.

This mid-sized computing centre, located at the very heart of the research teams, is designed to provide tools for testing and prototyping digital experiments. Very-large-scale experiments can then be carried out using the national resources offered by GENCI (National High-Performance Computing Equipment).

A real test bed for scientific hypotheses, DANTE can test very large datasets, whether from observations or numerical modelling: processing and analysis of high-resolution satellite images; machine-learning modelling of lava properties, allowing a better approach to eruption dynamics; or analysis of big data in the social sciences.

"By extracting information from massive quantities of data, we can test hypotheses then develop and refine our models," explains Alexandre Fournier, scientific manager of the platform at the IPGP. "This equipment offers new digital opportunities to the Earth and Universe science communities, who must help develop new methodologies and advance our knowledge in these fields," he concludes.

Chiffres clés
Key figures

1921

19 membres du personnel.

19 staff members.

21 membres du Conseil de perfectionnement
(instance unique de l'époque incluant des membres extérieurs).

21 members of the Improvement Council
(a unique body at the time including external members).

4 sites

Station du parc Saint-Maur, Observatoire du Petit Port à Nantes, Station du Val Joyeux et le siège de l'IPGP rue de l'Université à Paris.

4 sites: Parc Saint-Maur Station, Petit Port Observatory in Nantes, Val Joyeux Station and the IPGP headquarters on rue de l'Université in Paris.

20 années

à la direction de l'IPGP pour le fondateur de l'institut Charles Maurain (1921-1941).

20 years at the head of the IPGP for the institute's founder Charles Maurain (1921-1941).

3 campagnes

de relevés magnétiques en France cette année là.

3 magnetic survey campaigns in France that year.

2021

520 membres du personnel.

520 staff members.

16e

Position d'Université Paris Cité dans le classement de Shanghai pour les Sciences de la Terre (l'IPGP comprenant l'ensemble des sciences de la Terre d'UPCité).

Position of Université Paris Cité in the Shanghai ranking for Earth Sciences (IPGP includes all the Earth sciences of UPCité).

512 publications

dont 25 dans des revues à fort impact telles que Nature, Science et PNAS.

512 publications including 25 in high impact journals such as Nature, Science and PNAS.

7 sites

Observatoires de Guadeloupe, de Martinique, de La Réunion et de Chambon-la-Forêt, sites de Champs-sur-Marne, de Lamarck à Paris et le siège de l'IPGP rue Jussieu à Paris.

7 sites: Observatories in Guadeloupe, Martinique, La Réunion and Chambon-la-Forêt, sites in Champs-sur-Marne, Lamarck in Paris and the IPGP headquarters in rue Jussieu in Paris.

6 nouveaux chercheurs et enseignants-chercheurs.

6 new researchers and professors.

8 conférences
organisées pour le centenaire de l'institut (dont 2 en 2021).

8 conferences organised for the centenary of the Institute (including 2 in 2021).

40 M€ Budget total consolidé.

40 M€ Total consolidated budget.

MOOC « Notre Planète »
"Our Planet" MOOC

Après plusieurs mois de travail, la première session du cours en ligne, gratuit et ouvert à tous « Notre Planète » a été lancée en novembre 2021. Ce MOOC (Massive open online course), proposé par Alexandre Fournier et produit par l'IPGP et Université Paris Cité, a été suivi pendant près de trois mois par plus de 3000 personnes.

S'organisant en cinq chapitres, soit 20 vidéos, et animé par des chercheurs de renom tels que Sébastien Charnoz, Claude Jaupart, Mathilde Cannat, Bénédicte Menez, Frédéric Fluteau et Alexandre Fournier, le cours retrace l'histoire et l'activité géologiques de la Terre dans le système solaire, à destination du grand public (niveau lycéen requis).

L'équipe projet, composée du service communication, d'Alexandre Fournier et de plusieurs moniteurs d'enseignement, a produit un travail minutieux nécessitant plus d'une centaine de réunions, une vingtaine d'heures de tournage en studio, une dizaine de jours de montage vidéo, plus de 200 heures estimées à la création des illustrations, ainsi que deux jours de travail de préparation pour chacun des cinq enseignants intervenant dans le MOOC.

Le résultat semble à la hauteur de cet investissement puisque l'ensemble des 160 commentaires laissés par les apprenants à l'issue de ce MOOC sont positifs. Ils mettent en avant la qualité du contenu, mais aussi le haut niveau et la densité des sujets abordés, tout en restant accessibles à tous.
De prochaines sessions de ce cours seront bientôt ouvertes et une version anglophone est à l'étude, pour diffusion sur une plateforme internationale.

En savoir plus / Read more:
> France Université Numérique : fun-mooc.fr

After several months of work, the first session of the free massive open online course (MOOC) "Our Planet" was launched in November 2021. Proposed by Alexandre Fournier and produced jointly by the IPGP and Université Paris Cité, the course was followed for nearly three months by more than 3,000 people.

Divided into five modules and offering a total of 20 videos, the course was hosted by renowned researchers such as Sébastien Charnoz, Claude Jaupart, Mathilde Cannat, Bénédicte Menez, Frédéric Fluteau and Alexandre Fournier. It retraced the history and geological activity of the Earth in the solar system for the general public (secondary school level required).

The project team, composed of the communication department, Alexandre Fournier and several teaching assistants, worked meticulously as the MOOC required more than a hundred meetings, about 20 hours of filming in the studio and 10 days of video editing, more than 200 hours for the illustrations, and two days of preparation for each of the five participating teachers.

The result appears to be worth the investment as all 160 comments left by the participants at the end of the MOOC were positive. They emphasised the quality of the content, but also the high level and density of the subjects covered, while remaining accessible to all. Future sessions of this course will soon be open and an English version is being considered for distribution on an international platform.

3177 apprenants venants de 71 pays.

3,177 participants from 71 countries.

20 vidéos, soit 3h09.

20 videos totalling 3 h and 9 min.

410 illustrations.

410 illustrations.

17 QCM.

17 MCQs.

62 % des inscrits sont allés jusqu'au bout.

62 % of participants completed the course.

99 % des apprenants satisfaits par le MOOC.

99 % of participants were satisfied with the MOOC.

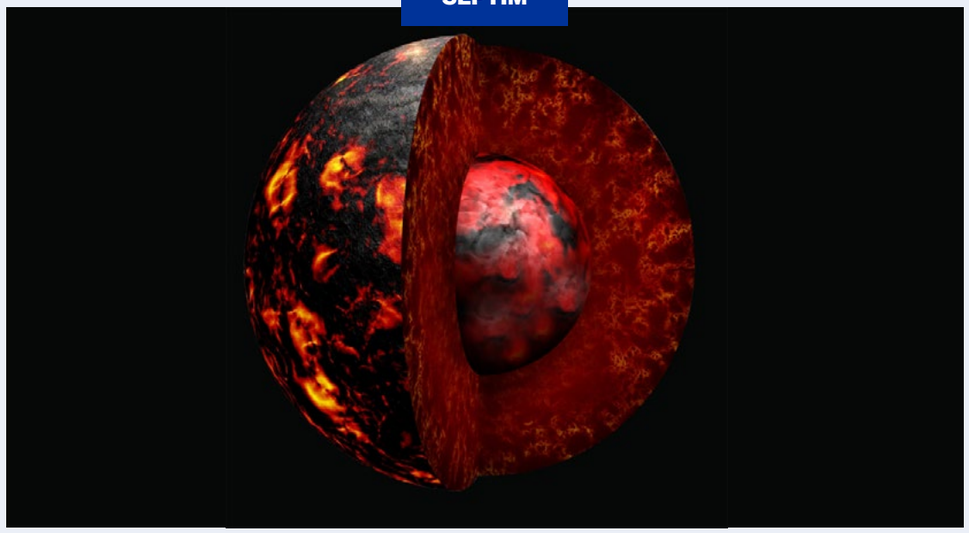
65 % des inscrits ont plus de 50 ans.

65 % of participants were over 50 years old.

Vie de la recherche
Research life

Projets européens
EU projects

SEPTIM



James Badro, de l'équipe de cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale, a obtenu une ERC Advanced Grant pour son projet SEPTIM (Solidification of Earth's Primitive Mantle), qui vise à faire la lumière sur le processus de refroidissement et de solidification de la Terre lorsqu'elle était encore une planète-magma.
Ce projet étudie la transition d'un manteau fondu à un manteau solide d'une façon pluridisciplinaire, en combinant des expériences de pétrologie expérimentale à haute pression et haute température, de la modélisation thermodynamique, des calculs théoriques ab initio et des simulations numériques géodynamiques.

James Badro, from the Cosmochemistry, Astrophysics and Experimental Geophysics team, has been awarded an ERC Advanced Grant for his project on the solidification of Earth's primitive mantle. SEPTIM aims to shed light on the cooling and solidification process that occurred when Earth was still a magma planet. It will focus on the transition from a molten to a solid mantle using a multidisciplinary approach combining experimental high-pressure, high-temperature petrology experiments, thermodynamic modelling, ab initio theoretical calculations and geodynamic numerical simulations.

PROMISCES

Éric van Hullebusch, de l'équipe de biogéochimie à l'anthropocène des éléments et contaminants émergents, a obtenu le financement par le programme européen « Green Deal » du projet PROMISCES (Preventing Recalcitrant Organic Mobile Industrial chemicalS for Circular Economy in the Soil-sediment-water system), coordonné par le BRGM. Ce projet a pour ambition de développer, tester et démontrer sur le terrain les technologies et les approches innovantes indispensables pour surveiller, prévenir et remédier aux rejets polluants industriels persistants, mobiles et potentiellement toxiques dans le système sol-sédiment-eau.

Éric van Hullebusch, from the Biogeochemistry at the Anthropocene of Elements and Emerging Contaminants team, has obtained funding from the European "Green Deal" programme for PROMISCES, a project on preventing pollution from recalcitrant organic mobile industrial chemicals for the circular economy that focuses on the soil-sediment-water system. Coordinated by the BRGM, this project is designed to develop, test and demonstrate in the field the innovative technologies and approaches needed to monitor, prevent and remediate persistent, mobile and potentially toxic industrial pollutants in this system.

Projets ANR
ANR projects

ACTIVE SW

Tectonique active et mécanisme de déformations dans les chaines en plis et chevauchements : apprendre du sud-ouest de Taiwan

Ce projet propose de mener une étude intégrant géodésie, sismologie, géomorphologie et modélisations analogique et numérique sur le système chevauchant localisé au sud-ouest de Taiwan. Ce travail examinera les processus contrôlant la déformation à différentes échelles de temps et d'espace. L'équipe de tectonique de l'IPGP est spécifiquement impliquée dans la mesure des déformations par corrélation optique et dans les aspects de géomorphologie.

Coordination ISTERRE, porté à l'IPGP par Yann Klinger de l'équipe de tectonique et mécanique de la lithosphère.

Active tectonics and deformation mechanism in fold and thrust mountain ranges: learning from southwest Taiwan

This project will integrate geodesy, seismology, geomorphology and both analogue and numerical modelling to study the thrust system in southwest Taiwan. It will examine the processes controlling deformation at different time and space scales. The IPGP's Tectonics team is specifically involved in the measurement of deformations by optical correlation and in geomorphological aspects.

Coordinated by ISTERRE. The IPGP's contribution is led by Yann Klinger from the Lithosphere Tectonics and Mechanics team.

FIMOPTIC

Instabilité des failles monitorées par des instruments optiques innovants

Ce projet vise à détecter et analyser les instabilités de failles asismiques/sismiques survenant sur deux sites très actifs, le rift de Corinthe (Grèce) et le site minier de Garpenberg (Suède). Les réseaux de surveillance locaux seront complétés par des instruments sur fibre optique, plus particulièrement par des capteurs innovants à haute résolution développés par l'IPGP : sismomètre de forage, inclinomètre longue base et extensomètre longue base.

Coordination IPGP, porté par Pascal Bernard de l'équipe de sismologie.

Fault instability monitored by innovative optical instruments

This project aims to detect and analyze the aseismic fault instabilities occurring within two highly active sites, the Corinth Rift (Greece) and the Garpenberg mining site (Sweden). The local monitoring arrays will be complemented by instruments on optic fiber, more specifically by innovative, high resolution sensors developed by the IPGP: borehole seismometer, long-base tiltmeter, and long-base strainmeter.

IPGP coordination, led by Pascal Bernard of the seismology team.

IRONSTONE

Intégration des dynamiques microbiennes profondes dans la zone critique

IRONSTONE évaluera comment et dans quelle mesure la circulation d'eau qui favorise les gradients chimiques soutient le développement d'écosystèmes dans un aquifère fracturé (Observatoire CZEN de Ploemeur, France).
Ce projet s'appuie sur une méthodologie originale combinant des expériences microfluidiques innovantes et l'utilisation de nouveaux traceurs sur le terrain avec des approches de génomique, de thermodynamique et de microimagerie de pointe. Il permettra de mieux comprendre la dynamique microbienne profonde et son influence sur les flux biogéochimiques dans la zone critique.

Coordination ECOBIO, porté à l'IPGP par Bénédicte Ménez de l'équipe de géomicrobiologie.

Integrating deep microbial dynamics in the critical zone

IRONSTONE will assess how and to what extent water circulation favoring chemical gradients drive deep microbial activity and associated biogeochemical reactions in a fractured aquifer (CZEN Ploemeur Observatory, France). This project relies on an original methodology that integrates innovative microfluidic experiments, novel field tracer tests, environmental genomics, thermodynamics and state-of-the-art microimaging that will provide a new understanding of deep microbial dynamics and its influence on aquifer-scale biogeochemical fluxes in the critical zone.

ECOBIO coordination, led at the IPGP by Bénédicte Ménez of the Geomicrobiology team.

SUBSILAKE

Impact de la crise séismo-volcanique sur le lac de cratère thalassohalin Dziani Dzaha, Mayotte

Le Dziani Dzaha, situé sur l'archipel de Mayotte, abrite un écosystème aquatique strictement microbien, stable à long terme, et présentant une combinaison impressionnante d'analogies avec des environnements précambriens. Depuis 2018, la subsidence de Mayotte, liée à des éruptions sous-marines sans précédent au large de l'archipel, induit une entrée d'eau dans le lac, qui pourrait déstabiliser son écosystème, offrant une occasion unique d'étudier sa résilience. C'est l'objectif de ce projet qui interface des approches de géochimie et de microbiologie.

Coordination IPGP, porté par Magali Ader de l'équipe de géochimie des isotopes stables.

Impact of the seismic-volcanic crisis on Dziani Dzaha, the thalassohaline crater lake on Mayotte

Dziani Dzaha, located on the Mayotte archipelago, is home to a strictly microbial aquatic ecosystem stable over the long term and bearing an impressive combination of similarities to Precambrian environments. Since 2018, Mayotte's subsidence — linked to unprecedented underwater eruptions off the archipelago — has led to water entering the lake. This could destabilise its ecosystem, and offers a unique opportunity to study its resilience. This then is the project's objective, through geochemical and microbiological approaches.

Coordinated by the IPGP and led by Magali Ader from the Stable Isotope Geochemistry team.

CARBOMAGNET

Contribution des bactéries magnétotactiques à la séquestration du carbone inorganique et des éléments alcalino-terreux par la formation de phases minérales carbonatées intracellulaires

Ce projet a pour objectif d'étudier les processus moléculaires et géochimiques de la biominéralisation intracellulaire de phases amorphes de carbonate de calcium (iACC), formées par des bactéries magnétotactiques à l'interface oxie-anoxie (OAB) dans des environnements aquatiques marins et d'eau douce, où de forts gradients chimiques se développent. CarboMagnet fournira ainsi de nouveaux modèles microbiens pour ces processus et quantifiera la contribution des réservoirs de bactéries magnétotactiques au cycle du carbone et des éléments alcalino-terreux (AEE) dans ces environnements.

Coordination IMPMC, porté à l'IPGP par Didier Jézéquel de l'équipe de biogéochimie environnementale.

Contribution of magnetotactic bacteria to the sequestration of inorganic carbon and alkaline earth elements through the formation of intracellular carbonate mineral phases

This project is designed to study the molecular and geochemical processes involved in the biomineralization of intracellular amorphous calcium carbonate (iACC) phases formed by magnetotactic bacteria at the oxic-anoxic boundary (OAB) in marine and freshwater aquatic environments, where strong chemical gradients develop. CarboMagnet will thus provide new microbial models for these processes and quantify the contribution of magnetotactic bacterial reservoirs to the carbon cycle and alkaline earth elements (AEEs) in these environments.

Coordinated by the IMPMC. The IPGP's contribution is led by Didier Jézéquel from the Environmental Biogeochemistry team.

BRUIT-FM

Compréhension, prévention et utilisation du bruit sismologique en fond de mer

Ce projet multidisciplinaire vise à identifier et à exploiter les signaux cachés dans le bruit sismologique à large bande du plancher océanique. Le but est de cataloguer les différentes sources de bruit, de comprendre leurs contributions au bruit sismologique local et global et d'améliorer les signaux individuels en éliminant les autres.

Coordination IPGP, porté par Wayne Crawford de l'équipe de géosciences marines.

Understanding, prevention and use of seismic noise at seafloor level

This multidisciplinary project seeks to identify and exploit signals hidden in the broadband seismic noise of the seafloor. The aim is to catalogue the different noise sources, understand their contributions to local and global seismic noise and improve individual signals by eliminating others.

Coordinated by the IPGP and led by Wayne Crawford from the Marine Geosciences team.

MYGALE

Modélisation physico-chimique des gradients de l'altération hydrothermale : sentinelle de la dynamique d'instabilité gravitaire des volcans explosifs

Le projet MYGALE vise à analyser le rôle de l'altération hydrothermale dans l'augmentation des risques d'instabilité et d'effondrement des flancs des volcans actifs à partir de l'exemple de la Soufrière (Guadeloupe). En collaboration avec l'OVSG-IPGP, MYGALE construira un réseau de surveillance optimisé permettant de limiter les risques volcaniques, applicable dans le monde entier.

Coordination par l'ITES - Institut Terre Environnement de Strasbourg, porté à l'IPGP par Marina Rosas-Carbajal de l'équipe Systèmes volcaniques.

Physico-chemical modelling of hydrothermal alteration gradients, sentinel of the dynamics of gravity-driven instability in volcanoes with explosive eruptions

This project seeks to analyse the role of hydrothermal alteration in increasing the risks of instability and collapse of the flanks of active volcanoes, using the example of the Soufrière in Guadeloupe (French West Indies). In collaboration with the OVSG-IPGP, MYGALE will develop an optimized monitoring network applicable worldwide to limit volcanic risks.

Coordinated by the ITES - Earth and Environment Institute of Strasbourg. The IPGP's contribution is led by Marina Rosas-Carbajal from the Volcanic System team.

RAD-NET

Transfert radiatif 3D dans les atmosphères planétaires nuageuses : application à Titan, Vénus et Mars

L'objectif de ce projet est de développer un modèle de transfert radiatif 3D sphérique pour l'étude d'atmosphères et de surfaces planétaires. Celui-ci sera principalement utilisé pour comprendre les cycles de la chimie organique de Titan en caractérisant la composition de la surface et des nuages dans la région polaire d'hiver, et pour modéliser la structure thermique de cette région avec le modèle climatique de l'IPSL.
RAD-NET étudiera également les interactions chimie-microphysique au-dessous et dans les nuages de Vénus, ainsi que les nuages et les espèces photochimiques dans le vortex polaire d'hiver martien.

Coordination LESIA, porté à l'IPGP par Sébastien Rodriguez de l'équipe de planétologie et sciences spatiales.

3D radiative transfer in cloudy planetary atmospheres: application to Titan, Venus and Mars

This project is designed to develop a 3D spherical radiative transfer model for the study of planetary atmospheres and surfaces. It will be used mainly to shed light on Titan's organic chemistry cycles by characterizing its surface and cloud composition in the winter polar region, and to model the thermal structure of this region with the IPSL climate model. RAD-NET will also study the chemical-microphysical interactions below and in the clouds of Venus, and the clouds and photochemical species in the Martian winter polar vortex.

Coordinated by LESIA. The IPGP's contribution is led by Sébastien Rodriguez from the Planetology and Space Sciences team.

ASTUS

Tourbillons de fumée s'élevant dans la stratosphère

Ce projet étudie les tourbillons anticycloniques de fumée qui montent dans la stratosphère suite à un feu de forêt ou une éruption volcanique, ainsi que leur distribution et leur impact sur le climat et la couche d'ozone.

Coordination LadHyx, porté à l'IPGP par Angela Limare de l'équipe de dynamique des fluides géologiques.

Smoke vortices rising into the stratosphere

This project studies the anticyclonic vortices of smoke that rise into the stratosphere following a forest fire or volcanic eruption, as well as their distribution and impact on the climate and ozone layer.

Coordinated by the LadHyX laboratory. The IPGP's contribution is led by Angela Limare from the Geological Fluid Dynamics team.

ESR/EquipEx+

Projets ESR/EquipEx+
ESR/EquipEx+ projects

Les projets MARMOR, GAIA Data et TERRA FORMA, dont l'IPGP est un partenaire majeur, font partie des 50 projets retenus par un jury international lors du dernier appel à manifestation d'intérêt « Équipements structurants pour la recherche » du PIA3.

The MARMOR, GAIA Data and TERRA FORMA projects, in which the IPGP is a major partner, were among the 50 projects selected by an international jury during the last PIA 3 call for expressions of interest for "structuring equipment for research".

TERRA FORMA

Apporter une nouvelle vision multi-messagers au sein des observatoires sur le long-terme

L'habitabilité de la Terre, pour toutes les formes de vie, est remise en question par l'action de l'être humain qui a déstabilisé les équilibres naturels. Comment observer et définir les interactions complexes qui relient les humains et leur environnement ? Le projet propose de relever ces défis majeurs en développant et testant une plateforme d'observation in-situ qui s'appuie sur des réseaux de capteurs intelligents pour apporter une nouvelle vision multi-messager, couplant les points de vue des capteurs sur les dynamiques humaine, biotique et abiotique et leurs interactions au sein des territoires. Le projet se concentre sur quatre enjeux clés : le capital sol, la ressource en eau, la pression chimique, la biodiversité et l'intégrité des paysages.

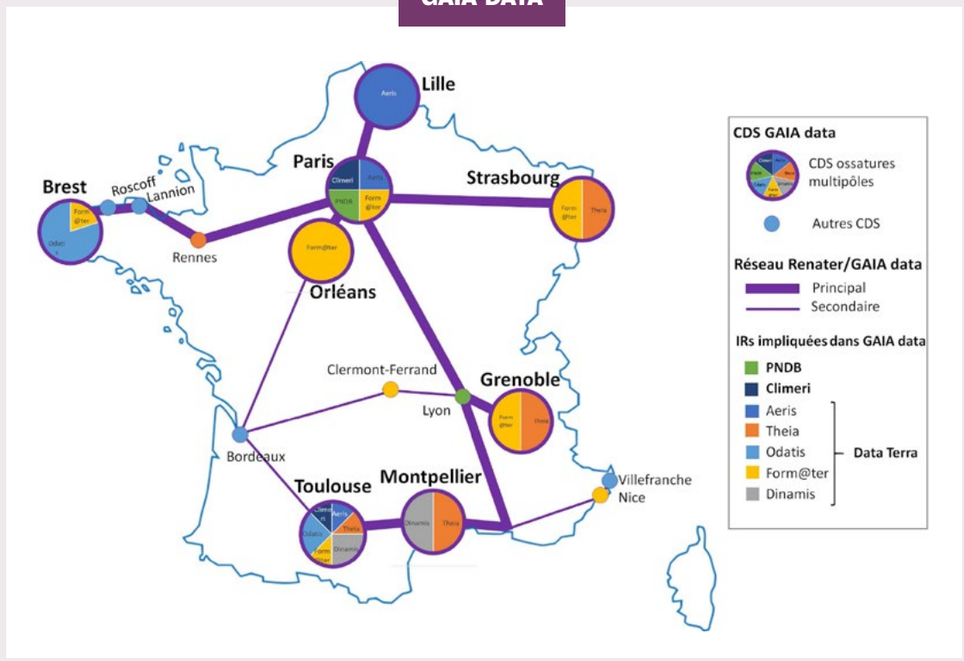
Coordination CNRS, porté à l'IPGP par Jérôme Gaillardet de l'équipe de géochimie des enveloppes externes.

Bringing a new multi-messenger vision to observatories in the long term

The Earth's habitability for all forms of life is being jeopardized by the actions of human beings, who have destabilized its natural balance. How can we observe and define the complex interactions that link humans with their environment? The project proposes to address these major challenges by developing and testing an in-situ observation platform that relies on smart sensor networks to provide a new multi-messenger vision, coupling sensor views on human, biotic and abiotic dynamics and their interactions within regions. The project focuses on four key issues: soil capital, water resources, chemical pressure, biodiversity and landscape integrity.

Coordinated by the CNRS. The IPGP's contribution is led by Jérôme Gaillardet from the External Envelopes Geochemistry team.

GAIA-DATA



De la donnée à la connaissance du système Terre : gérer l'explosion des flux et de la diversité des données

Les trois infrastructures de recherche Data Terra, CLIMERI-France et PNDB s'associent pour porter le projet GAIA Data destiné à développer un dispositif global d'accès à des données, produits et services FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), une infrastructure distribuée permettant d'observer, comprendre et prévoir de manière intégrée l'histoire, le fonctionnement et l'évolution du système Terre soumis aux changements globaux. GAIA Data permettra de répondre aux enjeux scientifiques d'approches multidisciplinaires et multi-échelles du système Terre, impliquant les composantes atmosphère, océans, surfaces continentales, Terre interne, glaces et biodiversité.

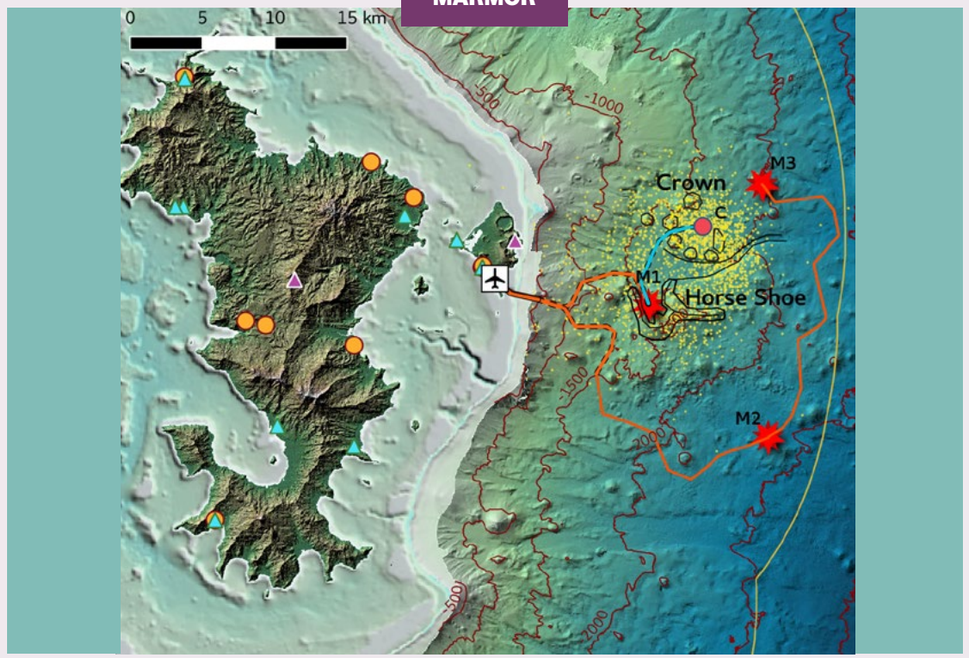
Coordination CNRS, porté à l'IPGP par Claudio Satriano du Centre de données IPGP.

From data to knowledge of the Earth system: managing the explosion of data flows and diversity

The three research infrastructures Data Terra, CLIMERI-France and PNDB have joined forces to conduct the GAIA Data project designed to develop a global system for access to FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) data, products and services. This will be a distributed infrastructure for integrated observation, understanding and prediction of the history, functioning and evolution of the Earth system subject to global changes. GAIA Data will address the scientific challenges of multidisciplinary and multi-scale approaches to the Earth system, involving the atmosphere, oceans, land surfaces, the Earth's core, ice and biodiversity components.

Coordinated by the CNRS. The IPGP's contribution is led by Claudio Satriano from the IPGP Data Center.

MARMOR



Équipement géophysique de recherche marine avancée et observatoire multidisciplinaire pour la recherche et la surveillance à Mayotte

L'objectif de ce projet est de fournir à la communauté scientifique française de nouveaux équipements mobiles et câblés nécessaires à l'étude des déformations terrestres, de la sismicité, des tsunamis, du volcanisme et des questions environnementales clés dans les zones océaniques et côtières, en étendant les capacités d'observation terrestre au domaine marin. Le projet prévoit également la construction d'un observatoire multidisciplinaire des fonds marins et de la colonne d'eau pour surveiller la crise sismo-volcanique sous-marine au large de Mayotte.

Coordination Ifremer, porté à l'IPGP par Arnaud Lemarchand de l'équipe des observatoires volcanologiques et sismologiques.

Marine Advanced geophysical Research equipment and Mayotte multidisciplinary Observatory for research and Response

This project is designed to provide the French scientific community with new mobile and wired equipment needed to study land deformation, seismicity, tsunamis, volcanism and key environmental issues in oceanic and coastal areas, by extending terrestrial observation capabilities to the marine domain. The project also includes the construction of a multidisciplinary seafloor and water column observatory to monitor the underwater seismic-volcanic crisis off Mayotte.

Coordinated by the Ifremer. The IPGP's contribution is led by Arnaud Lemarchand from the Volcanological and Seismological Observatories team.

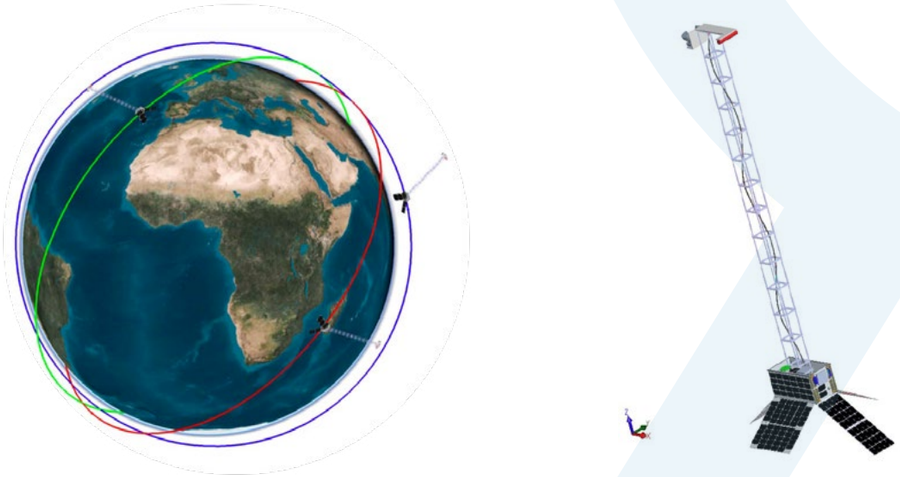
NanoMagSat

Une constellation de nanosatellites pour le suivi et l'étude du champ magnétique terrestre et de l'environnement ionosphérique

A nanosatellite constellation to monitor Earth's magnetic field and ionospheric environment

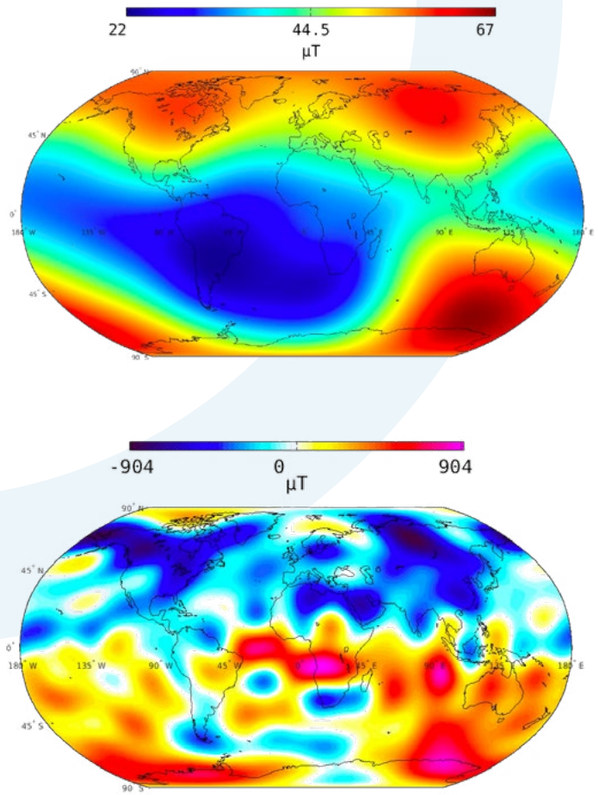
Le champ magnétique terrestre protège notre planète du flux interplanétaire de particules chargées et organise la façon dont l'environnement spatial proche et les couches supérieures ionisées de l'atmosphère réagissent à l'activité solaire. Cette réponse peut produire de forts signaux magnétiques susceptibles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

The Earth's magnetic field protects our planet from incoming energetic charged particles and organizes the way the near outer space and the ionized upper layers of the atmosphere respond to solar activity. This response can produce strong magnetic signals that can damage ground technology such as power transmission networks, radiation hazards that can affect satellites in the near outer space, and multiple ionospheric perturbations that can severely perturb radio transmissions, radars and Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Monitoring Earth's magnetic field and ionospheric environment is crucial for investigating these phenomena. It also is important for understanding the way the field is evolving on the long term, aiding precise navigation, revealing properties of the shallow and deep Earth, and providing key information for geophysical surveys.



Constellation (gauche) et satellites (droite) de la mission NanoMagSat (Hulot et al. Final Scout Consolidation Phase Report to ESA, 2020). Les trois satellites identiques sont des cubesats 16U, équipés de panneaux solaires et d'un bras déployables. Le magnétomètre vectoriel absolu auto-calibré miniaturisé (en rouge) est positionné sur un banc optique à l'extrémité du bras, avec un jeu de caméras stellaires, permettant une restitution d'attitude. Le magnétomètre haute fréquence est positionné à mi-bras, tandis que le reste de la charge utile (sonde de Langmuir et récepteurs GNSS) se trouve sur le corps du satellite. Le bras permet d'éviter que les mesures magnétiques ne soient perturbées par le satellite lui-même ou les autres instruments.

The NanoMagSat constellation (left) and satellites (right) (Hulot et al. Final Scout Consolidation Phase Report to ESA, 2020). The three identical satellites are 16U cubesats, with deployable solar panels and boom. The miniaturized self-calibrated absolute vector magnetometer (in red) is on an optical bench at the tip of the boom, together with a set of star trackers, which provide attitude restitution. The miniature high frequency magnetometer sits at mid-boom, while the rest of the payload (Langmuir probe and GNSS receivers) is on the body of the satellite. The boom ensures that magnetic measurements are not affected by undesired signals from the satellite and other sensors.



Intensité du champ magnétique principal à la surface de la Terre en 2015 (haut), et composante radiale de ce même champ à la surface du noyau au sein duquel ce champ est produit (bas). Ces deux cartes ont été reconstruites en utilisant les données Swarm des instruments ASM en mode vectoriel (Vigneron et al., EPS, 2021). Notez la faible intensité centrée sur l'Atlantique Sud (anomalie de l'Atlantique Sud, en bleue dans la carte du haut), dont l'origine est liée à l'existence de régions où les lignes de champ entrent dans le noyau (en bleues dans la carte du bas) au lieu d'en sortir. Suivre, comprendre et prédire l'évolution de cette anomalie, responsable de risques majeurs d'irradiation en orbite basse, est l'un des défis nécessitant l'observation permanente du champ magnétique terrestre.

Main magnetic field intensity at Earth's surface in 2015 (top), and radial component of the same field at the surface of the core whithin which this field is being produced (bottom). Both maps have been built using Swarm ASM vector mode data (Vigneron et al., EPS, 2021). Note the weak intensity above the South Atlantic region (blue South Atlantic Anomaly in the top map), the cause of which are the regions were the field enters (in blue in the bottom map), instead of exiting the core surface. Monitoring, understanding and predicting the evolution of this anomaly, responsible for higher risk of space weather hazards in this region, is one of the challenge requesting permanent high resolution monitoring of the field.

Cette surveillance est actuellement menée grâce aux observatoires magnétiques déployés à la surface de la Terre, tels que ceux du réseau INTERMAGNET auquel contribue l'IPGP, et aux trois satellites de la mission Earth Explorer Swarm de l'agence spatiale européenne (ESA), qui embarquent des magnétomètres absolus (ASM), conçus par le CEA-Léti, fournis par le CNES et sous

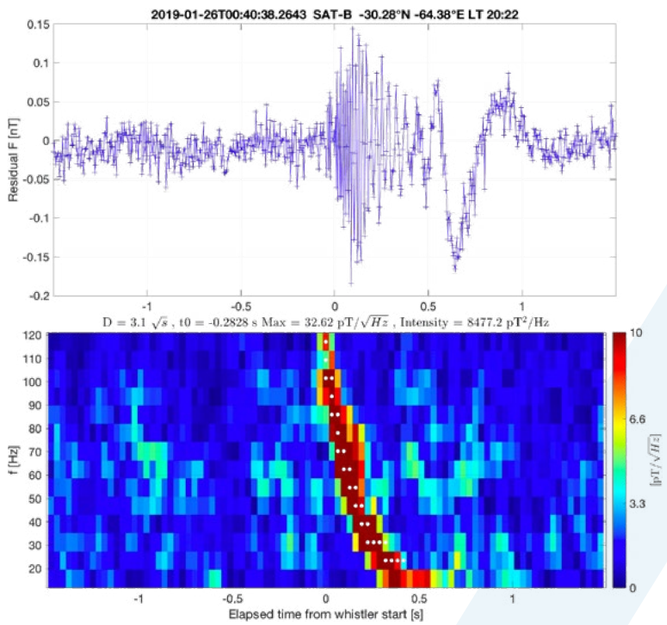
This monitoring is currently done from ground, using magnetic observatories (such as those from the INTERMAGNET network to which the IPGP contributes) and from space, by relying on the three satellites of the European Space Agency (ESA) Earth Explorer Swarm constellation, which carry Absolute Scalar Magnetometers (ASM) built by CEA-Léti, customer

la responsabilité scientifique de l'IPGP. Tirant parti du retour d'expérience de la mission Swarm, le projet NanoMagSat, initié par l'IPGP et le CEA-Léti avec le soutien du CNES, a été proposé par un consortium associant la société Open Cosmos et l'Université d'Oslo, pour une possible mise en œuvre dans le cadre du programme « Scout » de l'ESA. Le projet a été sélectionné pour une étude de « Risk Retirement Activity » qui doit commencer en janvier 2022 pour une durée de 18 mois.

La mission prévue consiste en une constellation de « Cubesats » de type 16U (20 x 20 x 40 cm^3), conçue pour offrir une stratégie de revisite innovante : un satellite sera placé en orbite polaire tandis que les deux autres seront sur des orbites inclinées à 60°. La charge utile embarquée sera inédite et comprendra en particulier une version miniaturisée des instruments ASM de Swarm, pouvant être opérés en mode vectoriel absolu auto-calibré pour fournir les données nécessaires au suivi des composantes planétaires du champ magnétique. Un mode scalaire haute fréquence permettra quant à lui l'identification de « siffleurs » produits par les éclairs atmosphériques, dont le signal dans les fréquences ELF (Extremely Low Frequencies) peut être exploité pour sonder l'ionosphère. Un magnétomètre vectoriel à haute fréquence complètera ce dispositif, ainsi qu'une sonde de Langmuir multi-électrodes et deux récepteurs GNSS bi-fréquence, pour la reconstruction du contenu électronique total (TEC) et l'obtention de données d'occultation ionosphérique.

furnished by the French space agency CNES and under the scientific responsibility of the IPGP.
Building on Swarm's achievements, NanoMagSat was initiated by the IPGP and the CEA-Léti with CNES support and next proposed with Open Cosmos and the University of Oslo for possible implementation in the context of the ESA Scout program. The project was selected for an 18 months "Risk Retirement Activity" phase, bound to start in January 2022.

The mission will consist of a 16U (20 x 20 x 40 cm^3) cubesat constellation with an innovative revisiting strategy: one satellite will be on a polar orbit and two on 60° inclined orbits. The payload will also be unprecedented. In particular it will use a miniaturized version of the ASM instruments flown on Swarm, which can be operated as a self-calibrated absolute vector magnetometer delivering the type of data needed to monitor the planetary components of the magnetic field, as well as in a so-called burst scalar mode that allows the identification of Extremely Low Frequency (ELF) whistler signals produced by lightning. These can next be used to sound the ionosphere. The payload will be complemented by a high-frequency vector magnetometer, a multi-needle Langmuir probe and two dual frequency GNSS receivers for recovery of Total Electron Content and ionospheric radio-occultation data.



Exemple de siffleur détecté dans les fréquences ELF par les instruments ASM de Swarm en mode burst (en haut). L'analyse spectrale de ce signal (en bas) révèle une dispersion du signal (les fréquences élevées arrivant en premier), qui témoigne des propriétés du plasma le long du trajet ionosphérique d'un signal impulsif produit par un éclair atmosphérique (Coisson et al., 2021 AGU Fall meeting). Grâce aux données magnétiques à haute fréquence, NanoMagSat aura la capacité de sonder l'ionosphère de cette manière sous les satellites, tandis que le TEC au-dessus des satellites, les données de radio-occultation, ainsi que les densités et températures électroniques locales seront fournis par les récepteurs GNSS et les sondes de Langmuir.

Example of ELF whistler detected by the ASM instruments on board Swarm when in burst mode (top). The analysis in spectral terms of this signal (bottom) reveals the dispersion of the signal (with high frequencies arriving first), which testifies for the plasma condition along the ionospheric path of the signal, initiated as an impulse by a lightning strike in the atmosphere (Coisson et al., 2021 AGU Fall meeting). NanoMagSat will have the ability to permanently sense the ionosphere below the satellites in this way thanks to its high frequency magnetic data, while top-side TEC, ionospheric radio-occultation data and local electron density and temperature information will be provided by its GNSS receivers and Langmuir probes.

sommaire/contents

Cette constellation aidera les chercheurs à mieux comprendre la dynamique du noyau terrestre responsable de l'évolution du champ magnétique principal et les différents types de courants électriques qui entourent et parcourent notre planète : ceux ionosphériques et magnétosphériques qui témoignent de la réponse de la Terre au vent solaire, ceux produits par la circulation et les marées océaniques, ainsi que ceux, induits, qui circulent dans la Terre solide. En outre, la constellation améliorera encore la cartographie globale de la distribution des roches aimantées présentes dans la lithosphère.

Enfin, les futures mesures in-situ permettront d'étudier la dynamique du plasma ionosphérique, à petites et grandes échelles. NanoMagSat est conçue comme une première étape vers l'extension dans l'espace du réseau INTERMAGNET d'observatoires magnétiques, qui permettra le suivi permanent du champ magnétique de la Terre et de son environnement ionosphérique.

Coïsson, P., Hulot, G., Mlynarczyk, J., Chauvet, L., Truhlik, V., Buresova, D.
Analysis of Remarkable Whistler Events in the ELF Recorded by Swarm Satellites
AGU Fall Meeting, San Francisco, USA,
Abstract AE22A-06, 2021.

Hulot, G., Coïsson, P., Clausen, L., Maiden, D., Vigneron, P., Alken, P., Grayver, A., Thébault, E., Olsen, N., Finlay, C., Kuvshinov, A., Chulliat A.
SNM-OC-PM-016 Scientific File for NanoMagSat mission v3.0
Final Scout Consolidation Phase
Report to ESA, 152 pages, 2020.

sommaire/contents

This constellation will allow scientists to better understand the Earth's core dynamics that drives the main field evolution, as well as the various electrical currents that surround and flow within our planet: those in the ionosphere and magnetosphere that testify for the way the Earth responds to the solar wind, those produced by oceanic circulation and tides, and those induced in the solid Earth. The constellation will also further help improve the global mapping of the distribution of magnetized rocks within the lithosphere.

Additionally, in-situ measurements will allow studying the dynamics of the ionospheric plasma, both at large and small scales. NanoMagSat is designed as a first step towards expanding to space the INTERMAGNET network of magnetic observatories to permanently monitor the Earth's magnetic field and ionospheric environment.

Vigneron, P., Hulot, G., Léger, J.M., Jager, T.
Using improved Swarm's experimental absolute vector mode data to produce a candidate Definitive Geomagnetic Reference Field (DGRF)
2015.0 model, Earth Planets and Space, 73 : 197
DOI 10.1186/s40623-021-01529-7, 2021

Contacts gh@ipgp.fr ; coisson@ipgp.fr

Prix et distinctions
Awards and honours

Kristel Chanard

Géodésie
Geodesy

Prix de l'EGU « Géodésie » du meilleur scientifique en début de carrière
EGU Geodesy Division Outstanding Early Career Scientist Award

Marc Chaussidon

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

Grade de chevalier de la légion d'honneur
Knight of the Legion of Honour

Chauvel Catherine

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

« Norman L. Bowen Award and Lecture » de l'AGU
AGU Norman L. Bowen Award and Lecture

Yann Klinger

Tectonique et mécanique de la lithosphère
Lithosphere Tectonics and Mechanics

Prix Pierre Pruvost de la Société Géologique de France
Pierre Pruvost Prize of the Geological Society of France

Arnaud Lemarchand

Observatoires volcanologiques et sismologiques
Volcanological and Seismological Observatories

Grade de chevalier de l'ordre national du Mérite
Knight of the National Order of Merit

Philippe Lognonné

Planétologie et sciences spatiales
Planetology and Space Sciences

Prix international d'astronautique de la Société astronomique de France
International Astronautical Prize of the French Astronomical Society

Anne Mangeney

Sismologie
Seismology

Médaille Sergey Soloviev de l'EGU « Risques naturels »
EGU Natural Hazards Sergey Soloviev Medal

European Geosciences Union

Membre sénior de l'Institut universitaire de France
Senior Member of the University Institute of France

institut universitaire de France

Jean-Paul Montagner

Sismologie
Seismology

Médaille Inge Lehmann de l'AGU
AGU Inge Lehmann Medal

AGU ADVANCING EARTH AND SPACE SCIENCE

Aline Peltier

Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise
Volcanological Observatory of Piton de la Fournaise

Grade de chevalier de l'ordre national du Mérite
Knight of the National Order of Merit

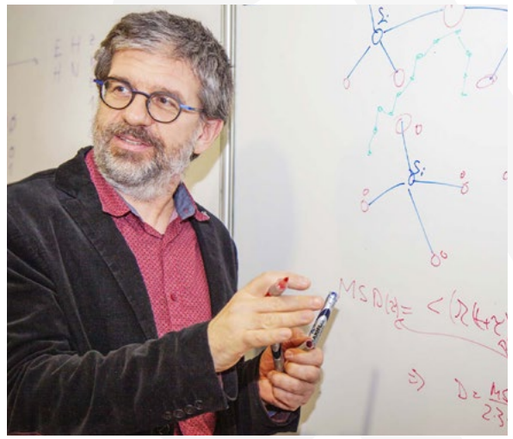
GRANDE CHANCELLERIE DE LA LÉGION D'HONNEUR

Médaille de la sécurité intérieure, échelon bronze
Homeland Security Medal, bronze level

MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR
Liberté Égalité Fraternité

sommaire/contents

Nouveaux chercheurs et enseignants-chercheurs
New researchers and professors



Razvan Caracas

Thème *Theme* Origines *Origines*
Statut *Position* Directeur de recherche du CNRS
CNRS Research Director
Contact caracas@ipgp.fr

Suite à un double cursus en géologie et sciences des matériaux, Razvan Caracas obtient son diplôme de doctorat en physique des matériaux en 2003 à l'Université Catholique de Louvain (Belgique). Après un premier post-doctorat effectué à l'Université de Minnesota (USA) en 2003-2004, il est titulaire d'une bourse de la Carnegie Institution of Washington en 2004-2006 à Washington DC (USA), puis d'une seconde bourse de la Fondation Humboldt au Bayerisches Geoinstitut (Université de Bayreuth, Allemagne) en 2006-2008. Il débute au Laboratoire de Géologie de Lyon (ENS de Lyon) en tant que chargé de recherche en 2007, puis devient directeur de recherche en 2014, avant d'arriver à l'IPGP en octobre 2021. Il utilise la physique fondamentale pour modéliser le comportement de la matière dans les conditions extrêmes de l'intérieur des planètes. Il se concentre sur les minéraux majeurs formant les planètes telluriques ainsi que sur les glaces planétaires formant les petits satellites ou les planètes géantes de glace.

Following a dual curriculum in geology and materials science, Razvan Caracas obtained his PhD in materials physics in 2003 at the Université Catholique de Louvain (Belgium). After a first post-doctoral scholarship at the University of Minnesota (USA) in 2003-2004, he was awarded a fellowship of the Carnegie Institution of Washington in 2004-2006 in Washington DC (USA), then a fellowship of the Humboldt Foundation at the Bayerisches Geoinstitut (University of Bayreuth, Germany) in 2006-2008. He started at the Laboratoire de Géologie de Lyon (ENS Lyon) as a CNRS researcher in 2007, then became senior researcher in 2014, before joining the IPGP in October 2021. He uses fundamental physics to model the behaviour of matter in the extreme conditions of the interior of planets. He focuses on the major minerals forming the telluric planets as well as on the planetary ices forming the small satellites or ice giants.

sommaire/contents

Jordane Corbeau

Thème *Theme* Risques naturels *Natural Hasards*
Statut *Position* Physicienne adjointe *CNAP physicist*
Contact corbeau@ipgp.fr

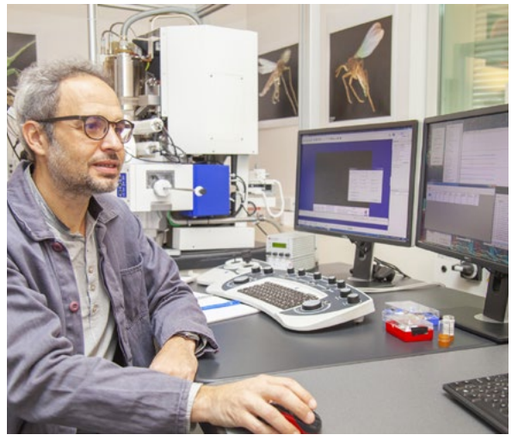
Jordane Corbeau obtient son doctorat en géosciences, ressources naturelles et environnement en 2015 à l'Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP, Sorbonne Université). Elle rejoint l'année suivante l'Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique (OVSM-IPGP) en tant que post-doctorante dans le cadre du projet Interreg PREST, où elle étudie l'activité sismotectonique des frontières de la plaque Caraïbe. En 2020, ses travaux sont récompensés par la fondation l'Oréal-UNESCO à travers le programme « Pour les Femmes et la Science » et le prix Jeunes Talents France 2020. Elle est ensuite recrutée en tant que physicienne adjointe à l'IPGP en septembre 2021. Ses recherches s'appuient sur l'analyse des données enregistrées par les réseaux sismologiques afin d'étudier le cycle sismique de la subduction des Petites Antilles, les interactions entre la sismicité régionale et celle des édifices volcaniques actifs, ainsi que la possible occurrence de séismes majeurs dans la région.

Jordane Corbeau obtained her PhD in Geosciences, Natural Resources and Environment in 2015 at the Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP, Sorbonne Université). The following year, she joined the Volcanological and Seismological Observatory of Martinique (OVSM-IPGP) as a post-doctoral fellow in the framework of the Interreg PREST project, where she studied the seismotectonic activity of the Caribbean plate boundaries. In 2020, her work was rewarded by the L'Oréal-UNESCO foundation through the "For Women in Science" programme and the France 2020 Young Talents prize. She was then recruited as an assistant physicist at the IPGP in September 2021. Her research is based on the analysis of data recorded by seismological networks in order to study the seismic cycle of the Lesser Antilles subduction, the interactions between regional seismicity and the seismicity of active volcanic edifices, and the possible occurrence of major earthquakes in the region.

sommaire/contents

Nouveaux chercheurs et enseignants chercheurs New researchers and professors

Fidel Costa



Thèmes *Themes* Intérieurs de la Terre et des planètes *Earth and Planetary interiors*
Risques naturels *Natural Hazards*
Statut *Position* professeur *professor*
Contact costa@ipgp.fr

Fidel Costa obtient son doctorat à l'Université de Genève en 1999. Titulaire d'une bourse Marie Skłodowska-Curie au CNRS (Orléans, France) l'année suivante, il devient chercheur post-doctoral à l'université de la Ruhr à Bochum (Allemagne) en 2002, puis boursier Ramon y Cajal au CSIC de Barcelone en 2005. En 2010, il rejoint l'Earth Observatory of Singapore (Nanyang Technological University) en tant qu'enseignant-chercheur à l'Asian School of the Environment (ASE) où il restera 12 ans, dont trois années à la direction. En 2013, il reçoit la prestigieuse médaille Wager de l'IAVCEI (International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior). Fidel étudie la quantification des processus magmatiques en lien avec les données de surveillance des volcans dans le but de mieux anticiper les éruptions volcaniques. Pour cela il combine modélisation pétrologique, géochimique, expérimentale et numérique.

Fidel Costa obtained his PhD at the University of Geneva in 1999. He was awarded a Marie Skłodowska-Curie fellowship at the CNRS (Orléans, France) the following year, and became a post-doctoral researcher at the Ruhr University in Bochum (Germany) in 2002, followed by a Ramon y Cajal fellowship at the CSIC in Barcelona in 2005. In 2010, he joined the Earth Observatory of Singapore (Nanyang Technological University) as a professor at the Asian School of the Environment (ASE) where he stayed for 12 years, including three years as Chair. In 2013, he received the prestigious Wager Medal from the IAVCEI (International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior). Fidel studies the quantification of magmatic processes in relation to volcano monitoring data in order to better anticipate volcanic eruptions. He uses a combination of petrological, geochemical, experimental and numerical modelling approaches.

sommaire/contents

Zacharie Duputel

Thème *Theme* Risques naturels *Natural Hazards*
Statut *Position* Chargé de recherche CNRS
CNRS Research Fellow
Contact duputel@ipgp.fr

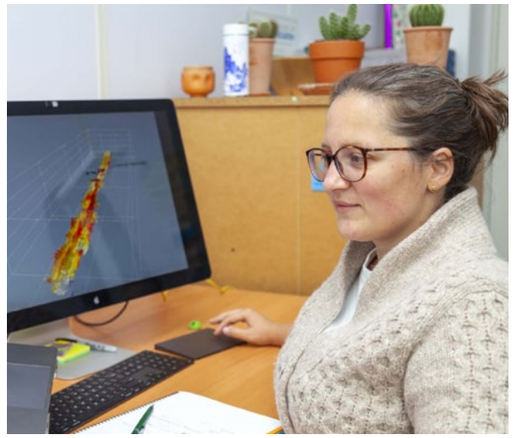
Zacharie Duputel obtient son doctorat en géophysique à l'Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS) en 2011. Il conduit ensuite deux ans de recherche post-doctorale au California Institute of Technology (Caltech) avant d'être recruté comme chargé de recherche CNRS à l'IPGS en 2013. Il intègre finalement l'IPGP pour rejoindre l'OVPF en septembre 2021. Ses activités de recherche sont principalement axées sur la compréhension des mécanismes physiques à la source des séismes se produisant dans différents systèmes géologiques actifs (failles, volcans). Il s'intéresse en particulier à produire des modèles décrivant la réponse de la Terre à divers phénomènes (ruptures sismiques, intrusions magmatiques, effondrements de calderas, etc.). Ce travail repose sur la modélisation de données sismologiques et géodésiques, l'inférence bayésienne ainsi que différentes méthodes permettant d'améliorer les catalogues de sismicité.

Zacharie Duputel obtained his PhD in Geophysics at the Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS) in 2011. He then conducted two years of post-doctoral research at the California Institute of Technology (Caltech) before being recruited as a CNRS research fellow at the IPGS in 2013. He finally arrived at the IPGP to join the OVPF in September 2021. His research activities mainly focus on the understanding of the physical mechanisms behind earthquakes occurring in active geological systems (faults, volcanoes). He is particularly interested in producing source models describing the Earth's response to various phenomena (seismic ruptures, magma intrusions, caldera collapses, etc.). This work is based on modelling of seismological and geodetic data, Bayesian inference and various methods to improve seismicity catalogs.

sommaire/contents

Nouveaux chercheurs et enseignants chercheurs New researchers and professors

Milena Marjanović



Thème *Theme* Intérieurs de la Terre et des planètes
Earth and Planetary interiors
Statut *Position* Chargé de recherche CNRS
CNRS Research Fellow
Contact marjanovic@ipgp.fr

À la suite de l'obtention de son doctorat à l'Université de Columbia (New York, USA) en 2013, Milena Marjanović reçoit une bourse individuelle Marie Skłodowska-Curie à l'IPGP en étant détachée dans le secteur industriel (Shell, Pays-Bas). Chercheuse post-doctorale à l'IPGP jusqu'en 2020, elle est recrutée par le CNRS l'année suivante. Milena est une géophysicienne marine qui a participé à six campagnes en mer dans les océans Atlantique et Pacifique, avec deux nouvelles campagnes prévues au cours des deux prochaines années. Ses recherches portent sur la distribution passée et présente du magma le long des dorsales et sur des phénomènes connexes tels que l'accrétion crustale, la segmentation des dorsales, la circulation hydrothermale et l'intrusion de dykes. En parallèle, elle développe et applique des techniques géophysiques de pointe pour étudier l'architecture et la dynamique des réservoirs magmatiques.

After obtaining a PhD. at Columbia University (New York, USA) in 2013, Milena Marjanović received a Marie Skłodowska-Curie individual fellowship hosted at the IPGP with the secondment within the industry sector (Shell, the Netherlands). Postdoctoral researcher at the IPGP until 2020, she was recruited by the CNRS the following year. Milena is a Marine Geophysicist who has participated in six research cruises in the Atlantic and Pacific oceans, with two new sea-going experiments scheduled in the next couple of years. Her research tackles past and present melt distribution along mid-ocean ridges and related phenomena such as crustal accretion, ridge segmentation, hydrothermal circulation, and dike intrusion. In parallel, she develops and applies advanced geophysical techniques to address the architecture and dynamics of magma reservoirs.

sommaire/contents

Interférométrie radar / Radar interferometry

Entretien avec Raphaël Grandin, Maître de conférences à l'IPGP dans l'équipe « Tectonique et mécanique de la lithosphère »

Interview with Raphaël Grandin, Lecturer at the IPGP in the "Tectonics and Mechanics of the Lithosphere" team

Qu'est-ce que l'interférométrie radar et comment l'utilise-t-on ?

What is radar interferometry and how is it used?

Cette technique exploite des images radar acquises par des satellites évoluant à une altitude de 700 km. Ces derniers « illuminent » la Terre à l'aide d'une antenne radar et collectent les échos rétrodiffusés par la surface.

A chaque passage, deux images sont formées :

- Tout d'abord, une image « d'amplitude », en noir-et-blanc, permet de cartographier les propriétés de surface. Les zones qui rétrodiffusent peu d'énergie, telles que la mer et la glace, apparaissent en noir, tandis que les régions urbaines et les forêts ont un aspect plus brillant. Les images radar peuvent ainsi être formées de jour comme de nuit, en traversant les couches nuageuses, contrairement à l'imagerie optique. La résolution de ces images varie selon le mode d'acquisition, jusqu'à 50 cm pour certains satellites. Les applications vont du suivi de l'activité volcanique ou de l'écoulement des glaciers jusqu'aux applications militaires, en passant par la surveillance des stocks de matières premières ou du trafic maritime.

- Ensuite, une image dite « de phase », permet de déterminer la distance entre le satellite et la surface. Il est ainsi possible de mesurer très précisément les mouvements du sol, jusqu'au millimètre par an, en calculant des « interférogrammes », c'est-à-dire

This technique uses radar images acquired by satellites flying at an altitude of 700 km. They "illuminate" the Earth with their radar antennas and collect the echoes backscattered from the surface.

Two images are formed on each pass:

- Firstly, a black-and-white "amplitude" image is used to map the surface properties. Areas that backscatter little energy (such as sea and ice) appear black, while urban areas and forests have a brighter appearance. Unlike optical imagery therefore, radar images can be formed day and night, even through layers of cloud. The resolution of these images varies according to the mode of acquisition, and can even attain 50 cm for some satellites. Applications range from monitoring volcanic activity or glacier flow through to military uses and the monitoring of raw material stocks or maritime traffic.

- Then, a "phase" image is used to determine the distance between the satellite and the surface. This enables ground movements to be measured with great precision, as little as a millimetre per year, by calculating "interferograms", i.e. by monitoring the change in phase from one acquisition to the next. Due to the proliferation of sensors and open data in recent years, scientists can now measure tectonic movements (whether rapid ones during earthquakes

sommaire/contents

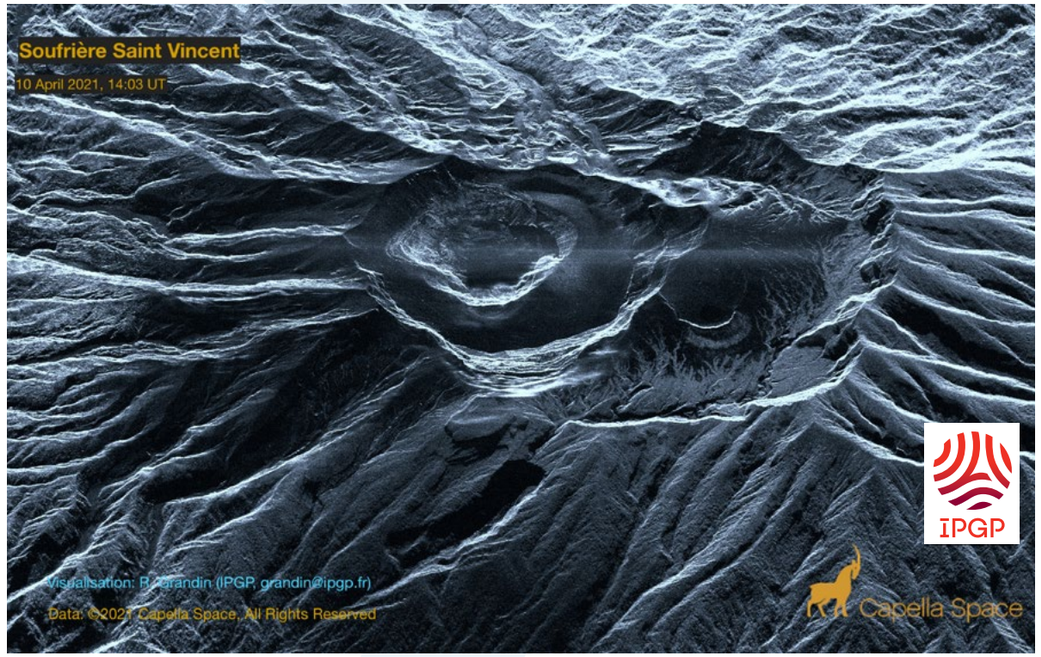


Image radar à ultra-haute résolution du cratère de la Soufrière de Saint-Vincent, acquise le 10 avril 2021, captée pendant une éruption, alors que le volcan crachait un panache de cendres et d'aérosols le rendant invisible à l'observation optique. Le cratère présent au centre de l'image, de 600 m de diamètre, a été formé dans les 24 heures précédentes, suite à l'explosion d'un dôme de lave.

Ultra-high-resolution radar image of the Soufrière crater on the island of St-Vincent, acquired on 10 April 2021. Image captured during an eruption when the volcano was spewing a plume of ash and aerosols that made it invisible to optical observation. The crater in the centre of the image, 600 m in diameter, was formed in the previous 24 hours by the explosion of a lava dome.

en suivant l'évolution de la phase d'une acquisition à la suivante. Grâce à la multiplication des capteurs et l'ouverture des données ces dernières années, les scientifiques peuvent désormais mesurer les mouvement tectoniques (qu'ils soient rapides lors de séismes ou lents lorsque les plaques tectoniques se déplacent), détecter le transport de magma sous les volcans, observer les glissements de terrain, suivre les mouvements verticaux liés à l'exploitation de réservoirs (d'eau, de gaz, de pétrole...) ou aux activités géotechniques souterraines, etc. Il est ainsi réalisable de « filmer » une déformation, même lorsqu'aucune instrumentation au sol n'est disponible. La sécurité des personnels, la répétitivité des mesures et la possibilité de revenir en arrière dans le temps en explorant l'archive en font un complément naturel à la mesure des déformations sur le terrain par les méthodes traditionnelles, telles que le GPS. En contrepartie, cette technique impose de traiter de grands volumes de données, nécessitant des compétences d'ingénierie spécifiques et des moyens de calcul dimensionnés en conséquence.

or slow ones from the shifting of tectonic plates), detect magma transport under volcanoes, observe landslides, and monitor vertical movements due to the exploitation of reservoirs (water, gas, oil, etc.) or to underground geotechnical activities, etc. It is thus possible to "film" a deformation, even when no ground-based instruments are available. The safety of personnel, the repeatability of measurements and the possibility of going back in time by exploring the archives make it a natural complement to field measurements of deformations obtained by traditional methods such as GPS. On the other hand, this technique entails the processing of large volumes of data, requiring specific engineering skills and computing resources scaled accordingly.

sommaire/contents

Quels sont les projets qui utilisent cette technique à l'IPGP ?
Which projects at the IPGP use this technique?

De nombreuses études ont permis de mesurer les déformations associées aux grands séismes récents (ex : séisme du Népal en 2015) ou aux éruptions volcaniques majeures (ex : éruptions du volcan Ambrym au Vanuatu en 2018 et à Mayotte). Depuis 2019, avec le soutien du CNES, du pôle de données ForM@Ter et du nouveau Service National d'Observation ISDeform, le service « Flatsim » vise à traiter la totalité des données de l'archive Sentinel-1 sur des chantiers d'intérêt géodynamique majeur (Tibet, Chili, Balkans...). Ainsi, une carte de vitesse de la dépression de l'Afar (Afrique de l'Est), siège de phénomènes volcano-tectoniques uniques au monde, a pu être produite de manière automatique en quelques jours de traitement sur le HPC du CNES, ce qui auparavant aurait nécessité des mois de travail.

Numerous studies have measured the deformations associated with recent major earthquakes (e.g. Nepal in 2015) or major volcanic eruptions (e.g. the Ambrym volcano in Vanuatu in 2018, or the underwater volcanic crisis off Mayotte). Since 2019, with the support of the CNES, the ForM@Ter cluster and the new ISDeform National Observation Service, the FLATSIM service has been working to process all the data in the Sentinel-1 archive on sites of major geodynamic interest (Tibet, Chile, the Balkans, etc.). For example, a velocity map of the Afar Depression (East Africa), which is the site of unique volcano-tectonic phenomena, was produced automatically after just a few days of processing on the CNES HPC, whereas previously this would have needed months of work.

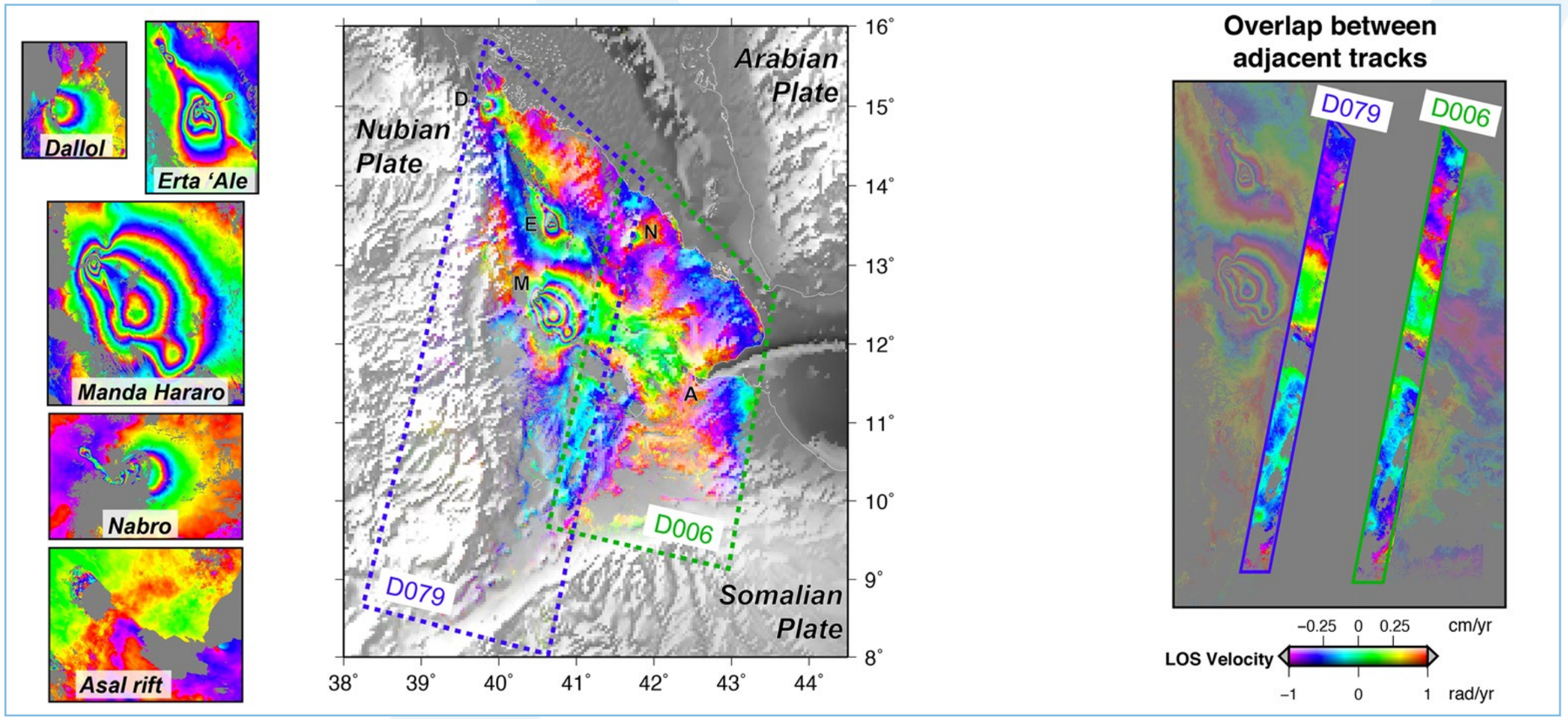
sommaire/contents

Comment envisagez-vous l'évolution de cette technique dans les années à venir et notamment à l'IPGP ?
How do you see this technique evolving in the coming years, especially at the IPGP?

Un soutien en ingénierie permettrait de renforcer les capacités de traitements massifs des données radar. En fédérant les efforts de la communauté scientifique, l'infrastructure de recherche « Data Terra » aurait la capacité de démocratiser l'exploitation de ces données, faisant ainsi émerger de nouvelles thématiques de recherche, telles que la surveillance de l'activité volcanique depuis l'espace, le suivi des mouvements verticaux engendrés par la fonte des glaces ou encore le fonctionnement des aquifères, des questions fondamentales pour mieux comprendre le changement climatique actuel.

Engineering support would enable us to increase capacity for massive processing of radar data. By combining the efforts of the scientific community, the Data Terra research infrastructure would be able to democratize exploitation of these data, thereby fostering the emergence of new research themes such as the monitoring of volcanic activity from space, the monitoring of vertical movements caused by melting ice, or the functioning of aquifers, all questions that are fundamental to a better understanding of current climate change.

Contact grandin@ipgp.fr



Carte de vitesse de mouvement du sol dans la dépression de l'Afar (Afrique de l'Est) à partir du traitement exhaustif des données Sentinel-1, entre 2014 et 2021. Chaque frange représente un incrément de vitesse de 1 cm par an.

Ground motion velocity map of the Afar Depression (East Africa) from the comprehensive processing of Sentinel-1 data between 2014 and 2021. Each fringe represents a velocity increment of 1 cm per year.

sommaire/contents

Intérieurs de la Terre et des planètes
Earth and Planetary Interiors

Les processus physico-chimiques intervenant à l'intérieur de la Terre sont responsables de multiples phénomènes observables à sa surface, tels que l'activité tellurique et volcanique ou encore l'existence du champ magnétique. La dynamique interne d'une planète détermine son évolution au cours des temps géologiques et sa compréhension nécessite une recherche pluridisciplinaire et le déploiement d'innovations technologiques de pointe. Ainsi, un sismomètre développé à l'IPGP pour équiper l'atterrisseur InSight transmet désormais les données sismiques de Mars, tandis que des expériences innovantes en conditions extrêmes de pression et de température permettent de répliquer directement les processus de formation des noyaux planétaires, et plus particulièrement celui de la Terre.

Ce thème revient notamment sur ce sujet cette année avec un focus sur les dernières expériences de dynamique des fluides, permettant de comprendre l'effet des impacts géants lors de la formation de la Terre sur le processus de formation de son noyau (Landeau et al.). Un autre article aborde quant à lui la

The physico-chemical processes occurring inside the Earth are responsible for many observable phenomena on its surface, such as telluric and volcanic activity or the existence of the magnetic field. The internal dynamics of a planet determines its evolution over geological time and its understanding requires multidisciplinary research and the deployment of cutting-edge technological innovations. A seismometer developed at the IPGP to equip the InSight lander now transmits seismic data from Mars, while innovative experiments under extreme pressure and temperature conditions make it possible to directly replicate the formation processes of planetary cores, and more particularly that of the Earth.

This theme returns to this subject this year with a focus on the latest fluid dynamics experiments, which allow us to understand the effect of giant impacts during the formation of the Earth on the formation process of its core (Landeau et al.). Another paper discusses the structure of the interior of Mars and proposes, in line with InSight models, the existence of a molten layer at the base of its

sommaire/contents

structure de l'intérieur de Mars et propose, dans le prolongement des modèles InSight, l'existence d'une couche fondue à la base de son manteau (Samuel et al.). Pour finir, une étude sismologique basée sur le réseau de sismomètres « fond de mer » dans l'océan indien permet d'imager le panache du point chaud de La Réunion jusqu'à la base du manteau, mettant en évidence son origine profonde et sa connexion avec la superstructure LLSVP africaine (Wamba et al.).

mantle (Samuel et al.). Finally, a seismological study based on the network of seismometers in the Indian Ocean makes it possible to image the plume from La Reunion hot spot to the base of the mantle, highlighting its deep origin and its connection with the African LLSVP superstructure (Wamba et al.).

#1

Aux origines de la différenciation de la Terre profonde
The origin of deep Earth differentiation

Les processus qui ont formé notre planète il y a 4,5 milliards d'années ont déterminé la température et la composition primordiales de la Terre profonde. De ces conditions initiales dépendent l'évolution du manteau et du noyau au cours des temps géologiques, du démarrage de la géodynamo à la tectonique des plaques.

Les observations isotopiques ont montré que le noyau métallique et le manteau silicaté se sont séparés au cours des cent premiers millions d'années du système solaire, tandis que des impacts géants accrétaient la Terre. Mais le manteau et le noyau se sont-ils mélangés lors de ces impacts ? Plus le mélange entre métal et silicates est important, plus les transferts chimiques sont efficaces. Celui-ci a donc contrôlé la composition du noyau et du manteau terrestres.

The processes that formed our planet 4.5 billion years ago set the primordial temperature and composition of the deep Earth. The evolution of the mantle and core over geological time, from the onset of the geodynamo to plate tectonics, depends on these initial conditions.

Isotopic observations have shown that the metallic core and silicate mantle separated during the first hundred million years of the solar system, while high-energy planetary collisions were building up Earth's mass. But did the mantle and core mix during these impacts?

Une équipe de scientifiques de l'IPGP, de l'Université de Cambridge, de l'Institut des Sciences de la Terre et de l'École Normale Supérieure de Lyon a modélisé en laboratoire les impacts ayant formé la Terre. Ces expériences reproduisent le processus d'ouverture d'un cratère tel qu'observé dans les simulations numériques et à la surface des planètes telluriques. Il s'avère que, contrairement aux simulations, ces expériences recréent les petites échelles de l'écoulement à l'origine du mélange.

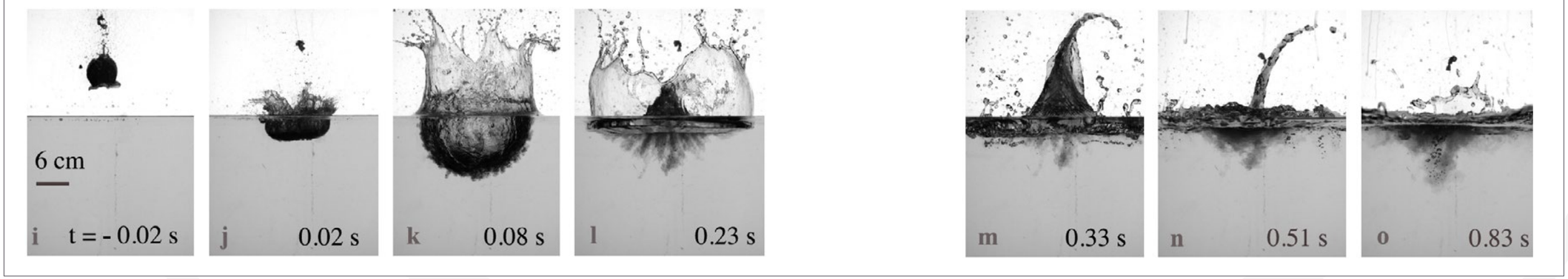
Les chercheurs obtiennent ainsi une loi d'échelle pour le mélange entre métal et silicates, qui varie en fonction de la vitesse et de la taille de l'impacteur. Extrapolée à la Terre, cette loi prédit que le métal et les silicates s'équilibrent parfaitement pour des impacteurs inférieurs à 100 km de diamètre. A l'inverse, l'équilibre chimique est incomplet pour des impacts géants comme celui qui aurait formé la Lune.

The larger the mixing between metal and silicates, the more efficient the chemical transfers. This mixing hence controlled the composition of the Earth's core and mantle.

A team of scientists from the IPGP, the University of Cambridge, the Ecole Normale Supérieure de Lyon and the Institut des Sciences de la Terre have modelled the impacts that formed the Earth in the laboratory. These experiments reproduce the cratering process that is observed in numerical simulations and on the surface of terrestrial planets. Unlike simulations, these experiments recreate the small-scale flow that is responsible for the mixing.

The researchers obtain a scaling law for the mixing between metal and silicates, which varies as a function of the speed and size of the impactor. Extrapolated to Earth, this law predicts full chemical equilibration between metal and silicates for impactors smaller than 100 km in diameter. In contrast, chemical equilibration is incomplete for giant impacts such as the one that formed the Moon.

Landeau M., Deguen R., Phillips D., Neufeld J. A., Lherm V., Dalziel S. B.
Metal-silicate mixing by large Earth-forming impacts
Earth and Planetary Science Letters, Vol. 564, 2021
DOI 10.1016/j.epsl.2021.116888
Contact landeau@ipgp.fr



Expérience de laboratoire modélisant les impacts qui ont formé la Terre. Un volume d'eau salée (représentant l'impacteur) impacte une cuve remplie d'eau (représentant le manteau terrestre). Le fluide impactant est coloré, ce qui permet de quantifier le mélange avec l'eau.
Laboratory experiment modelling the impacts that formed the Earth. A volume of salt water (representing the impactor) impacts a tank filled with water (representing the Earth's mantle). The impacting fluid is dyed, allowing the mixing to be quantified.

sommaire/contents Rapport annuel IPGP 2022 57

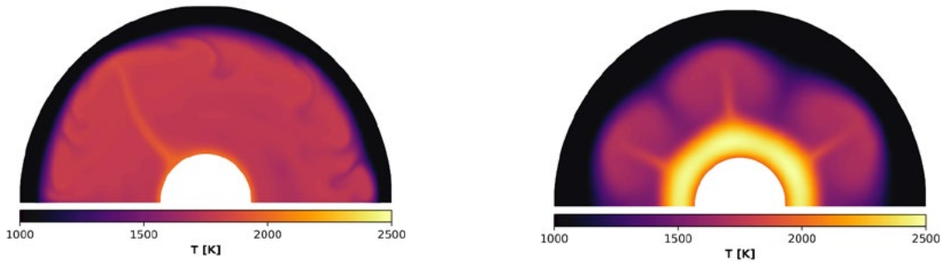
#2

L'évolution thermochimique de Mars influencée par sa stratification mantellique

The thermal and chemical history of Mars is influenced by its mantle stratification

La présence à l'intérieur de Mars d'enveloppes silicatées et métalliques bien distinctes indique que la planète a connu un stade précoce d'océan magmatique, dont la cristallisation a probablement conduit à la formation d'une couche stable à la base du manteau, fortement enrichie en éléments producteurs de chaleur et en fer par rapport au manteau sus-jacent.

The presence of distinct silicate and metal envelopes in the Martian interior indicates that the planet experienced an early stage of magma ocean, whose crystallisation probably led to the formation of a stable layer at the base of the mantle that had more heat-producing elements and iron than the overlying mantle.



Modélisation numérique de l'état thermique de Mars après 4.5 Ga d'évolution. **À gauche** : cas d'un manteau homogène. **À droite** : manteau avec une couche stratifiée stable enrichie en fer et en éléments producteurs de chaleur. Cette couche stable est purement diffusive et chaude, générant la présence de volumes importants de liquide silicaté au-dessus du noyau martien, capables de réfléchir des ondes sismiques.
Numerical modelling of the thermal state of Mars after 4.5 Ga of evolution. **Left figure**: homogeneous mantle. **Right figure**: mantle with a stable stratified layer enriched with iron and heat-producing elements. This stable layer is purely diffusive and hot, generating large volumes of silicate liquid above the Martian core that could reflect seismic waves.

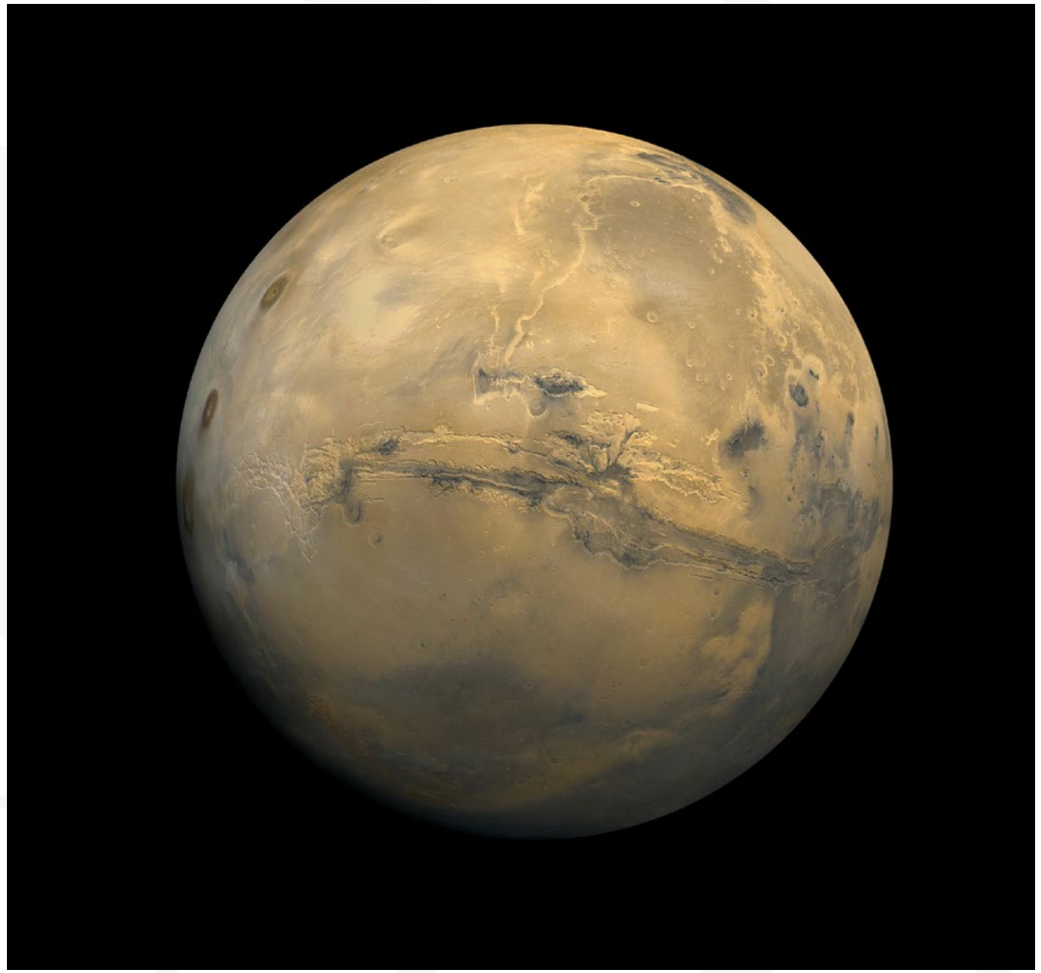
Une équipe de chercheurs de l'IPGP, de l'école polytechnique (ETH) de Zurich, du Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique (DLR) et de l'Observatoire royal de Belgique (ROB) a modélisé numériquement l'influence d'une telle couche sur l'évolution thermique et chimique de Mars. Ces travaux ont montré que la couche basale retarde fortement le refroidissement profond et affecte considérablement l'ensemble des caractéristiques de la planète (état thermique, épaisseurs crustale et lithosphérique, réponse au forçage des marées). En particulier, l'enrichissement de cette couche génère de grands volumes de fusion à proximité de la limite noyau-manteau.

La détection récente d'ondes sismiques réfléchies en profondeur a permis d'estimer la dimension du noyau

A team of researchers from the IPGP, the Swiss Federal Institute of Technology (ETH) in Zurich, the German Space Agency (DLR) and the Royal Observatory of Belgium (ROB) has numerically modelled the influence of such a layer on the thermal and chemical evolution of Mars. This work has shown that the basal layer greatly delays deep cooling and significantly affects the planet's overall characteristics (thermal state, crustal and lithospheric thickness, response to tidal forcing). The enrichment of this layer generates in particular large molten volumes near the core-mantle boundary.

The recent detection of reflected seismic waves at depth has made it possible to estimate the size of the Martian core (1,830 ±30 km radius), whose relatively large size implies a low density given the Red Planet's

sommaire/contents



martien (1830±30 km de rayon), dont la taille relativement grande implique une densité faible compte tenu de la masse totale de Mars. Cette densité nécessite une teneur considérable en éléments légers, difficile à expliquer par la simple présence d'éléments tels que le soufre. Toutefois, ce paradoxe pourrait être résolu par l'existence d'une couche basale silicatée fondue qui agirait comme un réflecteur sismique profond au-dessus du noyau, interprété comme un noyau apparent 100 à 200 km plus grand que sa taille réelle.

total mass. Such a density requires a considerable content of light elements, difficult to explain by the simple presence of elements such as sulphur. However, this paradox could be resolved by the existence of a molten silicate basal layer acting as a deep seismic reflector above the core, interpreted as an apparent core 100 to 200 km larger than its actual size.

Samuel H., Ballmer M., Padovan S., Tosi N., Rivoldini A., Plesa A-C.
The thermo-chemical evolution of Mars with a strongly stratified mantle
J. Geophys. Res. Planets, 126, 2021
DOI 10.1029/2020JE006613
Contact samuel@ipgp.fr

sommaire/contents

#3

Origine et structure du panache mantellique de La Réunion
Origin and structure of the Reunion Island mantle plume

Le cycle de vie des panaches volcaniques joue un rôle fondamental dans la réorganisation des plaques tectoniques et la dynamique globale de notre planète. Réussir à comprendre leur origine et leur structure en profondeur, ainsi que leurs manifestations en surface que sont les points chauds, reste un défi majeur encore largement débattu au sein de la communauté scientifique.

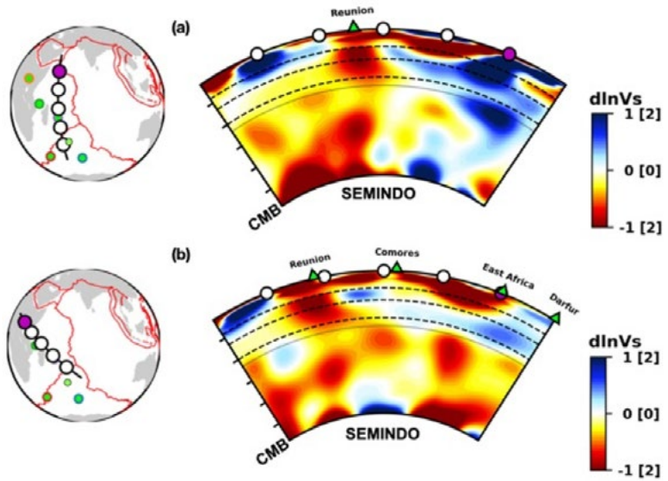
Le point chaud de La Réunion est l'un des plus actifs au monde après celui d'Hawaii, et le plus important parmi ceux de l'Océan Indien. Il est associé à l'épanchement volcanique des trapps du Deccan il y a 65 millions d'années, l'une des causes possibles de la disparition des dinosaures.

Le projet franco-allemand RHUM-RUM (2012-2016) a permis de lever le voile sur la structure profonde du panache réunionnais grâce à l'installation de 57 stations sismologiques de fond de mer tout autour de l'île dans l'Océan Indien. L'équipe de sismologie de l'IPGP a d'abord étudié le manteau supérieur et caractérisé les interactions entre ce panache et la

The life cycle of volcanic plumes plays a fundamental role in the reorganisation of tectonic plates and the global dynamics of our planet. Understanding their origin and structure at depth, and their surface manifestations as hotspots, remains a major challenge that is still widely debated in the scientific community.

The Reunion Island hotspot is one of the most active in the world after Hawaii, and the largest in the Indian Ocean. It is associated with the volcanic outpouring of the Deccan Traps 65 million years ago, one of the possible causes behind the extinction of dinosaurs.

The French-German RHUM-RUM project (2012-2016) has shed light on the deep structure of the Reunion plume by setting up 57 seafloor seismometers all around the island in the Indian Ocean. The IPGP seismology team first studied the upper mantle and characterised the interactions between this plume and the Central Indian Ridge, revealing a vast, low-shear-velocity region beneath the Mascarene Basin. The researchers then focused on the structure down to a depth of 1,200 km using a combination of data on surface wave



CMB (core-mantle boundary) = frontière noyau-manteau. Coupes à travers le modèle SEMINDO passant par le point chaud de La Réunion. **(a)** selon une direction nord-sud, du sud de l'océan jusqu'au point triple Aden-Owen-Carlsberg. **(b)** selon une direction sud-est—nord-ouest depuis la dorsale sud-est indienne jusqu'au rift africain. L'échelle des couleurs à droite va du rouge (vitesses lentes, matériau chaud) au bleu (vitesses rapides, matériau froid). Cette figure montre la connexion entre le point chaud de La Réunion et les structures ultra-lentes dans la couche D'' sous l'Afrique du Sud.
CMB = core-mantle boundary. SEMINDO cross-sections passing through the Reunion Island hotspot. **(a)** in a north-south direction from the southern ocean to the Aden-Owen-Carlsberg triple junction. **(b)** in a southeast-northwest direction from the Southeast Indian Ridge to the East African Rift. The colour scale on the right ranges from red (low velocities, hot material) to blue (high velocities, cold material). This figure shows the connection between the Reunion Island hotspot and the ultra-slow structures in the D'' layer beneath South Africa.

sommaire/contents

Intérieurs de la Terre et des planètes Earth and Planetary Interiors

Éruption au Piton de la Fournaise à La Réunion en décembre 2021.
Eruption at Piton de la Fournaise in Reunion Island in December 2021.

dorsale centrale indienne, en mettant en évidence une vaste zone de vitesse lente sous la lithosphère au niveau du bassin des Mascareignes. Les chercheurs se sont ensuite intéressés à la structure jusqu'à 1200 km de profondeur, en utilisant d'une part les données de modes harmoniques des ondes de surface, sensibles à de plus grandes profondeurs (jusque dans le manteau inférieur), et d'autre part des modélisations numériques basées sur la méthode des éléments spectraux et sur une méthode d'inversion de la forme d'onde complète.

Ce nouveau modèle appelé SEMINDO permet d'imager la zone à faible vitesse localisée sous La Réunion, s'étendant jusqu'à la base du modèle dans le manteau inférieur. Cette zone est connectée par un conduit plus étroit à une structure trouvant son origine dans la couche D'', située à l'interface entre le manteau et le noyau à 2900 km de profondeur. Les scientifiques de l'IPGP ont ainsi mis en évidence une connexion entre la LLSVP (Large Low Shear Velocity Province) sous l'Afrique du sud et le panache de La Réunion.

harmonic modes (which are sensitive at greater depths, including the lower mantle) and numerical modelling based on the spectral element method and a full waveform inversion method.

This new model, SEMINDO, was used to image the low-velocity zone under Reunion Island, extending to the base of the model in the lower mantle. This region is connected by a narrower duct to a structure originating in the D'' layer at the interface between the mantle and the core, at a depth of 2,900 km. IPGP scientists have thus identified a connection between the LLSVP (Large Low Shear Velocity Province) beneath South Africa and the Reunion Island plume.

Wamba M.D., Montagner J.-P., Romanowicz B. & Barruol G.
Multi-mode waveform tomography of the Indian Ocean upper and mid-mantle around the Réunion hotspot
Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126, e2020JB021490, 2021
DOI 10.1029/2020JB021490
Contact wamba@ipgp.fr

sommaire/contents

Risques naturels
Natural Hazards

Comprendre l'origine et le fonctionnement des éruptions volcaniques, des tremblements de terre, des tsunamis, des glissements de terrain ou encore des orages magnétiques constitue un enjeu majeur pour appréhender les aléas et risques associés. Ces phénomènes naturels demeurent le résultat de processus géologiques se produisant sur des échelles de temps et d'espace variées, dont l'analyse englobe la quasi-totalité des spécialités des sciences de la Terre. Leur étude à l'IPGP combine des approches de terrain (observations et mesures continues ou ponctuelles, en observatoire, lors de campagnes en mer, etc.), des observations depuis l'espace, des études et analyses d'échantillons en laboratoire, ainsi que des modélisations théoriques.

Cette édition 2021 du rapport annuel met plus particulièrement en avant des résultats obtenus sur les temps éruptifs grâce à la modélisation de la diffusion des éléments chimiques dans les minéraux (Metcalfe et al.), la modélisation des propriétés rhéologiques des magmas et verres grâce à l'intelligence artificielle (LeLosq et al.), ainsi que les avancées réalisées sur le bilan de la déformation cosismique grâce aux développements de la corrélation d'images optiques haute résolution (Antoine et al.).

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

This 2021 edition of the annual report highlights results obtained on eruptive times thanks to the modelling of the diffusion of chemical elements in minerals (Metcalfe et al.), the modelling of the rheological properties of magmas and glasses thanks to artificial intelligence (LeLosq et al.), as well as advances made on the coseismic deformation budget thanks to developments in the correlation of high resolution optical images (Antoine et al.)

sommaire/contents

#1

Les processus magmatiques conduisant aux éruptions à la Soufrière de Guadeloupe éclairés par l'étude des temps de diffusion dans les cristaux

Magmatic processes leading to eruptions at the Soufrière of Guadeloupe illuminated by the study of diffusion times in crystals

La Soufrière de Guadeloupe connait depuis plusieurs mois une période d'instabilité persistante, marquée en 2018 par un séisme de magnitude 4,1 ressenti par la population. Ce regain d'activité souligne la nécessité de mieux comprendre ce volcan, et plus particulièrement les processus dynamiques qui précèdent et conduisent aux éruptions. Une équipe internationale menée par des scientifiques de l'IPGP a exploré les échelles de temps de ces processus et a révélé que la réalimentation magmatique en profondeur a généralement lieu moins d'un an avant les éruptions explosives.

D'ordinaire, les signes avant-coureurs du réveil d'un volcan ne permettent de préciser ni la date, ni l'amplitude, ni le type de la future éruption. Toutefois, l'étude des éruptions passées peut aider à établir des modèles afin de mieux anticiper les possibles comportements éruptifs. En effet, les cristaux gardent une trace des conditions physico-chimiques régnant dans les chambres magmatiques, ainsi que les perturbations associées lors des phases de réalimentation. De ce fait, les temps de diffusion des éléments chimiques au sein des cristaux s'avèrent particulièrement utiles pour quantifier les échelles de temps caractéristiques des périodes de recharge et les mélanges magmatiques qui précèdent une éruption. Des profils de composition sont ainsi mesurés dans les cristaux et utilisés pour calculer le temps séparant un apport de magma en profondeur et l'éruption en surface : plus les profils de composition sont nets, plus le temps de diffusion chimique est court.

Cette étude utilise les dépôts basaltiques-andésitiques à andésitiques de la Soufrière de Guadeloupe, issus de différentes éruptions passées aux types, âges et amplitudes (telles que définies par leur indice d'explosivité volcanique VEI) variés : les éruptions datées à 1657 ans EC* (style vulcanien, VEI 2-3), 1010 ans EC (style plinien, VEI 4), ~ 341 ans EC (style strombolien, VEI 2) et 5680 ans AEC** (style plinien, VEI 4). En utilisant la diffusion du Fe-Mg dans l'orthopyroxène, les temps de diffusion calculés varient de 18.8±0.4 jours à 361±0.4 jours. Ces résultats montrent que les processus magmatiques précédant une éruption se déroulent sur des échelles de temps relativement courtes et apportent de nouvelles contraintes pour interpréter les signaux actuellement mesurés et leur possible évolution. Cependant, aucune corrélation claire n'existe entre le type et l'amplitude d'une éruption et le temps de diffusion calculé. Il demeure donc difficile d'anticiper ces caractéristiques précises pour la prochaine éruption à La Soufrière de Guadeloupe, qui peut aller d'une éruption strombolienne modérément explosive (VEI 2) à une éruption plinienne plus violente et dévastatrice (VEI 4). Il est donc primordial d'être préparé pour les cas d'éruptions pliniennes explosives pour lesquelles les temps de diffusion sont très courts.

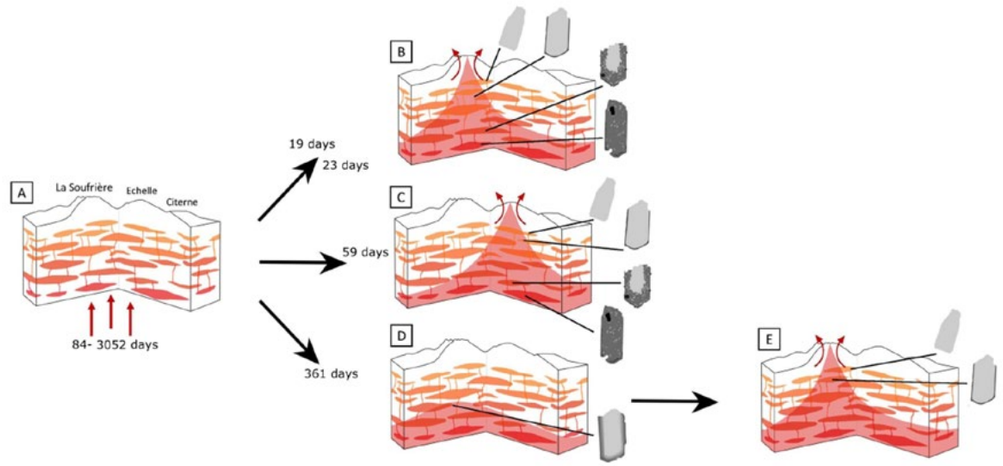
*EC : Ère commune (norme neutre remplaçant « après Jésus-Christ »)
**AEC : Avant l'ère commune (remplace « avant Jésus-Christ »)

The Soufrière of Guadeloupe has been experiencing a period of prolonged unrest, that culminated in 2018 when a magnitude 4.1 earthquake was felt by the population. This highlights the necessity of improving our understanding of this hazardous volcano and particularly the dynamic processes occurring prior to eruptions. An international team led by IPGP scientists investigated the timescales of magmatic processes at this volcano and revealed that the final magma recharge event has generally occured less than 1 year prior to previous explosive eruptions.

Signs of volcanic reactivation do not generally give any indication of the timing, size and style of future eruptions. However, detailed analysis of past eruptions can provide constraints and allow us to establish models that can be used to anticipate a range of future eruptive behaviours. Crystals keep a record of the physico-chemical environment of magma storage zones and of the disturbances of its equilibrium during magmatic recharges. From there, diffusion timescales in minerals are a particularly useful technique for quantifying the timescales of magma recharge and magma mixing that precede eruptive activity. Following this idea, compositional profiles across crystals are measured and used to calculate the time elapsed between a magmatic recharge and its subsequent eruption: the sharper the compositional diffusion profile is along these transects, the shorter is the time elapsed between the onset of the diffusion clock associated with magma recharge and its sudden ending during an eruption.

This study used basaltic-andesitic to andesitic eruption deposits from the Soufrière, Guadeloupe, covering a wide range of eruption styles, ages and magnitudes as defined by their volcanic explosivity index (VEI) : 1657 Cal. CE* (Vulcanian, VEI 2-3), 1010 Cal. CE (Plinian, VEI 4), ~341 Cal. CE (Strombolian, VEI 2) and 5680 Cal BCE** (Plinian, VEI 4). Using the diffusion of Fe-Mg in orthopyroxene, the timescales at the Soufrière of Guadeloupe were found to range from 18.8±0.37 days to 361±0.4 days. This shows that magmatic processes preceding an eruption can occur on relatively short time scales and provides new constraints for interpreting the current signals and their possible evolution. However, there is no clear distinction between the style/magnitude of the eruption and the calculated timescales. This implies that it remains very difficult to anticipate the style and intensity of the next magmatic eruption at the Soufrière of Guadeloupe, which could vary from mildly explosive VEI-2 strombolian eruptions, to much more violent and devastating VEI-4 explosive plinian eruptions. We must therefore be prepared for violent explosive eruptions of the Plinian type (VEI 4), such as the eruptions of 1010 CE or 5680 BCE, associated to short periods of unrest.

*CE: Common Era (replaces "Christian Era")
**BCE: Before the Common Era (replaces "Before Christ")



(A) Système de "mush" (magma enrichi en cristaux) avant l'éruption : cette étude suggère que les intrusions débutent entre 84 jours et 3052 jours avant l'éruption. **(B)** Dans le cas des éruptions de 1657 EC et 5680 AEC, la majorité du système a pu être affectée par une intrusion respectivement 19 et 23 jours avant l'éruption. **(C)** Pour l'éruption de ~341 EC : intrusion 59 jours avant l'éruption. La variation de l'emplacement de l'intrusion entraîne une déstabilisation et une éruption de l'évent du cône de l'Échelle. **(D)** Les processus résultant de l'éruption de 1010 EC se sont produits plus lentement que les autres éruptions : intrusion 361 jours avant l'éruption. Ce temps de latence très long suggère que le magma a peut-être été stoppé dans le système de mush mi-supérieur. **(E)** La déstabilisation du système entraîne l'éruption de populations de cristaux simplement zonés et non zonés, peut-être à partir des lentilles supérieures.

(A) The Soufrière mush system prior to eruption, this study suggests intrusions begin between a minimum of 84 days and 3052 days prior to eruption. **(B)** In the case of the 1657 CE and 5680 BCE eruptions, the expected value shows that the majority of the system could be affected by an intrusion 19 and 23 days prior to eruption, respectively. The intrusion moves through the system rapidly. **(C)** The ~341 CE eruption: intrusion 59 days before eruption. Variation in intrusion location, results in destabilisation and eruption from the Echelle vent. **(D)** Processes resulting in the 1010 CE eruption occurred slower than the other eruptions: intrusion 361 days prior to eruption. The very long delay time suggests that magma may have stalled in the mid-upper mush system. **(E)** System destabilisation results in eruption of populations of simply zoned and unzoned crystals, perhaps from the upper lenses.

Metcalfe A., Moune S., Komorowski J.C., Kilgour G., Jessop D.E., Moretti R. & Legendre Y.
Magmatic Processes at La Soufrière de Guadeloupe: Insights from Crystal Studies and Diffusion Timescales for eruption onset
Frontiers in Earth Science, 9, p.78., 2021
DOI 10.3389/feart.2021.617294
Contact metcalfe@ipgp.fr

#2

Déformation associée aux grands séismes par corrélation d'images satellitaires optiques à haute résolution

Deformation due to major earthquakes correlated using high-resolution optical satellite images

Mesurer le champ de déplacement au plus proche des zones de failles lors des grands séismes continentaux est un enjeu majeur pour la compréhension des mécanismes de la rupture ainsi que pour l'évaluation des risques sismiques. Lors d'un séisme, le déplacement en surface est accommodé à la fois par des ruptures visibles dans le paysage et par de la déformation diffuse volumique des matériaux. Sur le terrain, la mesure de la déformation localisée s'effectue classiquement en mesurant les décalages de marqueurs linéaires, tels que des routes ou des rivières. Néanmoins, le nombre de marqueurs reste généralement assez restreint, limitant la résolution de la courbe de glissement en surface. La déformation diffuse génère quant à elle des gradients de déformation de l'ordre d'un mètre par kilomètre, sur des distances de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres, perpendiculaires à la faille, et est donc difficilement détectable directement sur le terrain.

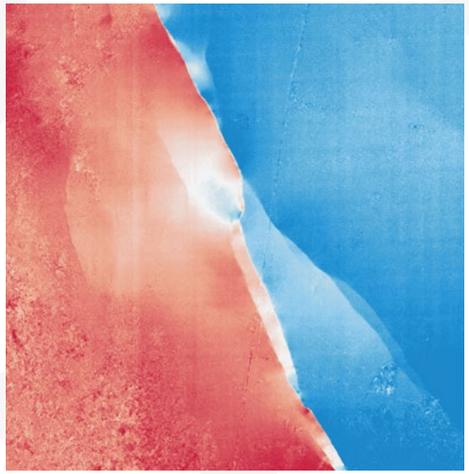
En utilisant des images satellites optiques à haute résolution (0,5 m), une équipe, dirigée par des chercheurs de l'IPGP, a pu observer et mesurer avec précision l'ensemble des déformations au sol lors de la séquence sismique de Ridgecrest (Californie, juillet 2019, Mw 6,4 et 7,1). Celle-ci a provoqué des ruptures sur plus de 70 km, avec des déplacements de la surface du sol de plusieurs mètres. Ces déformations ont fortement affecté la ville de Ridgecrest, ainsi qu'une zone militarisée inaccessible, à environ 200 km au nord-est de Los Angeles. La région étant désertique, elle est idéale pour l'observation par imagerie satellitaire optique.

Grâce à une collaboration active avec le CNES, via la Cellule d'Intervention d'Expertise Scientifique et Technique (CIEST), les chercheurs ont pu acquérir rapidement une couverture multi-stéréo de l'ensemble de la zone de rupture (50 x 20 km) avec le satellite imageur Pléiades. En utilisant l'outil open-source MicMac, développé en partenariat entre l'IGN et l'IPGP, ces données ont pu être corrélées avec des images d'archives issues des capteurs Pléiades et Worldview, pour produire des cartes du déplacement horizontal et vertical du sol avec une résolution de l'ordre de 50 cm. Contrairement aux mesures de terrain, cette méthode n'est pas dépendante de l'existence de marqueurs spécifiques et permet donc d'obtenir une mesure de déplacement homogène et dense, non seulement le long de la rupture sismique, mais aussi plus largement dans une zone de plusieurs kilomètres encadrant la rupture. Cette technique permet donc non seulement d'évaluer la déformation discrète localisée le long des failles, mais aussi la déformation diffuse volumique affectant une zone plus large autour de la rupture.

To understand rupture mechanisms and assess seismic risks, a key challenge lies in measuring the displacement field as near as possible to fault zones during major continental earthquakes. During an earthquake, surface displacement is mediated both by visible ruptures in the landscape and by diffuse volumetric deformation of materials. In the field, localised deformation is conventionally measured through the linear offset of markers such as roads or rivers. However, there are not normally many markers, which limits the resolution of the surface slip curve. Diffuse deformation generates deformation gradients of around one metre per kilometre over distances ranging from a few hundred metres to a few kilometres. As this deformation is perpendicular to the fault, it is difficult to detect directly on the ground.

Using high-resolution (0.5 m) optical satellite imagery, a team led by IPGP researchers was able to observe and accurately measure all the ground deformations that occurred during the Ridgecrest earthquake sequence (California, July 2019, Mw 6.4 and 7.1). It caused ruptures over a distance of more than 70 km, with surface displacements of several metres. These deformations strongly affected the town of Ridgecrest, as well as an inaccessible military zone about 200 km northeast of Los Angeles. This desert region is ideal for optical satellite imagery observations.

Thanks to an active partnership with the CNES through the CIEST scientific and technical expert response unit, the researchers were able to rapidly acquire multi-stereo coverage of the entire rupture zone (50 x 20 km) via the Pleiades imaging satellite. Using the MicMac open source tool developed jointly by the IGN and the IPGP, these data were correlated with archived images from Pleiades and Worldview sensors to produce maps of horizontal and vertical ground displacement with a resolution of around 50 cm. Unlike field measurements, this method does not depend on the existence of specific markers. It is therefore possible to obtain a homogeneous and dense displacement measurement not only along the earthquake rupture, but also in a wider zone several kilometres around it. This technique may be used to assess not only discrete deformation along faults, but also diffuse volumetric deformation over a wider area around the rupture.



Déplacement de surface est-ouest (rouge vers l'ouest, bleu vers l'est) autour de la zone épicentrale du séisme Mw 7.1 de Ridgecrest.

East-west surface displacement (red westward, blue eastward) around the epicentral zone of the Mw 7.1 Ridgecrest earthquake.

Grace à ces mesures, il a été possible de montrer que la déformation diffuse représente, en moyenne, 30% de la déformation totale associée à cette séquence sismique. Dans certaines zones, elle représente même l'intégralité de la déformation de surface, avec des amplitudes allant jusqu'à 2 m, alors qu'aucune rupture n'est visible sur le terrain. Cette quantification apporte des éléments nouveaux sur la façon dont la déformation co-sismique est accommodée lorsqu'elle atteint la surface et permet notamment de reconsidérer l'existence possible d'un déficit de glissement sur le plan de faille lorsqu'une rupture arrive en surface. Les résultats obtenus montrent qu'un tel déficit, s'il existe, serait largement compensé par la déformation diffuse dans le volume autour des failles qui ont rompu.

Ces recherches ont des implications importantes en termes d'évaluation de l'aléa et du risque sismique. Ils changent drastiquement notre vision du déplacement mesuré par les méthodes paléosismologiques pour les séismes anciens, ou encore l'évaluation du déplacement tectonique cumulé pour des objets géomorphologiques. Enfin, l'approche suivie montre le potentiel de l'analyse des images satellites à haute résolution pour un bilan complet de la déformation co-sismique, et ceci sur l'ensemble de la zone de faille ayant rompu.

These measurements revealed that the diffuse deformation represented, on average, 30% of the total deformation associated with this earthquake sequence. In some areas, it even represented all the surface deformation, with amplitudes of up to 2 m invisible on the ground. This quantification provides new insights into how co-seismic deformation is mediated when it reaches the surface, and in particular allows us to reconsider the possible existence of a slip deficit on the fault plane when a rupture reaches the surface. The results obtained show that if such a deficit existed, it would be largely compensated for by diffuse deformation in the volume around the ruptured faults.

This research has important implications for hazard and seismic risk assessment. It drastically changes our view of the displacement measured by palaeoseismological methods for ancient earthquakes, and the assessment of cumulative tectonic displacement for geomorphological objects. Finally, this approach shows the potential of high-resolution satellite image analysis for a comprehensive co-seismic deformation assessment covering the entire ruptured fault zone.

Antoine S., Klinger Y., Delorme A., Wang K., Burgmann R. & Gold R.
Diffuse deformation and surface faulting distribution from submetric image correlation along the 2019 Ridgecrest, California, ruptures
Bull. Seismol. Soc. Am, 2021
DOI 10.1785/0120210036
Contact santoine@ipgp.fr

#3

Les propriétés des magmas modélisées et prédites par apprentissage machine
Magma properties modelled and predicted by machine learning

Les aluminosilicates fondus et vitreux sont des matériaux critiques dans de multiples domaines. Trempés, ce sont des verres utilisés depuis des millénaires, allant des pointes de flèches en obsidienne aux écrans de smartphone. Fondus, ils constituent la partie liquide des magmas et laves et jouent ainsi un rôle fondamental dans l'évolution de notre planète, de la dynamique convective des océans magmatiques primordiaux aux éruptions volcaniques actuelles façonnant la surface terrestre. Malgré l'importance de ces géomatériaux, aucun modèle n'existe pour prédire leurs propriétés physiques et structurales, lesquelles contrôlent des phénomènes tels que la fragmentation des magmas lors des éruptions volcaniques explosives.

Dans une étude internationale innovante, une équipe menée par des chercheurs de l'IPGP montre qu'il est possible d'obtenir un modèle des propriétés physiques, thermodynamiques et structurales des aluminosilicates fondus et vitreux grâce à l'apprentissage machine. Les scientifiques ont combiné les dernières connaissances physico-chimiques et thermodynamiques sur ces matériaux avec les méthodes de calcul intensif du « Deep Learning », sur la nouvelle plateforme de calcul intensif DANTE, commune à l'IPGP et au laboratoire APC (CNRS, Université Paris Cité). Le modèle ainsi créé, nommé i-Melt, permet des prédictions des propriétés structurales et thermodynamiques de laves fondues simples (système Na_2O-K_2O-Al_2O_3-SiO_2) et de leurs verres, telles que leur viscosité, leur température de transition liquide-verre, leur indice de réfraction optique ou encore leur spectre Raman, signature vibrationnelle de la structure atomique du verre. Le modèle est en cours d'extension vers des compositions naturelles. Deux nouveaux oxydes (CaO et MgO) ont d'ores et déjà été ajoutés suite au travail effectué avec le soutien du Data Intelligence Institute of Paris (Université Paris Cité).

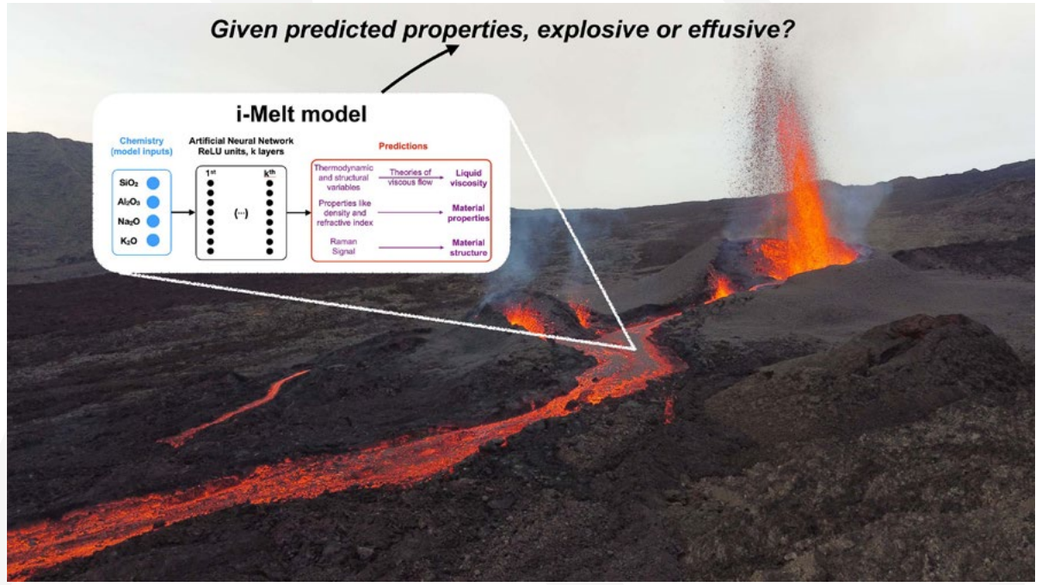
Ces recherches ouvrent des perspectives importantes pour la prédiction systématique et précise des propriétés des laves volcaniques et fontes verrières.

Molten and glassy aluminosilicates are critical materials in many fields. When tempered, this kind of glass has been used for thousands of years, for applications ranging from obsidian arrowheads to smartphone screens. When molten, they constitute the liquid part of magmas and lavas and thus play a fundamental role in the evolution of our planet, from the convective dynamics of the primordial magma oceans to the current volcanic eruptions that shape the Earth's surface. Despite the importance of these geomaterials, there was no model to predict their physical and structural properties, which govern phenomena such as the fragmentation of magmas during explosive volcanic eruptions.

In an innovative international study, a team led by IPGP researchers showed that it is possible to obtain a model of the physical, thermodynamic and structural properties of molten and glassy aluminosilicates using machine learning. The scientists combined the latest physico-chemical and thermodynamic knowledge on these materials with deep learning methods using the new DANTE intensive computing platform shared by the IPGP and the APC laboratory (CNRS, Université Paris Cité). The i-Melt model thus developed can predict the structural and thermodynamic properties of simple molten lava (Na_2O-K_2O-Al_2O_3-SiO_2 system) and its glasses. These properties include their viscosity, their liquid-glass transition temperature, their optical refractive index and their Raman spectrum, which is the vibrational signature of the atomic structure of a glass. The model is currently being extended to natural compositions. Two new oxides (CaO and MgO) have already been added following work carried out with the support of the Data Intelligence Institute of Paris (Université Paris Cité).

This research opens up important prospects for the systematic, accurate prediction of the properties of volcanic lavas and molten glass. The i-Melt model should help solve problems in materials science (design of new glasses, adjustment of their properties,

sommaire/contents



Pour utiliser le modèle, il suffit d'entrer la composition du verre/liquide étudié, qui sera passé à un réseau de neurones artificiels pour prédire les propriétés physiques et structurales du matériel. Le code est « open source », disponible sur Github (*https://github.com/charlesll/i-melt*) et un calculateur en ligne est disponible (*https://share.streamlit.io/charlesll/i-melt/imelt_streamlit.py*).

To use the model, simply enter the composition of the glass/liquid being studied, which will be passed to an artificial neural network to predict the physical and structural properties of the material. This open source code is available on Github, and is accompanied by an online calculator (link just above).

Le modèle i-Melt devrait permettre de résoudre des problèmes en sciences des matériaux (conception de nouveaux verres, ajustement de leurs propriétés…) et en géosciences. En particulier, il pourra être couplé aux codes de dynamique des fluides pour étudier l'influence des variations de la composition des laves sur la dynamique explosive/effusive des éruptions volcaniques, ou encore celle des propriétés dynamiques des magmas sur l'évolution des océans magmatiques primordiaux. Au-delà de ces problématiques, cette étude confirme le potentiel général offert par des modèles « gris » combinant apprentissage machine et équations théoriques.

etc.) and in geosciences. It could in particular be coupled with codes from the sphere of fluid dynamics to study the influence of variations in lava composition on the explosive/effusive dynamics of volcanic eruptions, or that of the dynamic properties of magmas on the evolution of primordial magma oceans. Beyond these issues, this study confirms the general potential offered by "grey" models combining machine learning and theoretical equations.

Le Losq C., Valentine A.P., Mysen B.O. & Neuville D.R.
Structure and properties of alkali aluminosilicate glasses and melts: Insights from deep learning
Geochimica et Cosmochimica Acta 314, 27–54, 2021
DOI 10.1016/j.gca.2021.08.023
Contact lelosq@ipgp.fr

sommaire/contents

Système Terre
Earth System Science

Le thème Système Terre s'attache à comprendre les interactions entre les enveloppes externes de notre planète (lithosphère, hydrosphère, biosphère et atmosphère), et par extension des corps célestes du système solaire. Ces milieux, qui mélangent organismes vivants, air, eau et roches, sont le théâtre de transformations chimiques, de réactions biologiques et de flux d'énergie et de matière. Ils jouent un rôle environnemental majeur dans l'évolution des surfaces, notamment la zone critique, définie comme la couche la plus externe de notre planète s'étendant de la base des aquifères au sommet de la couche limite atmosphérique. En concentrant la plupart des activités humaines, la zone critique est sujette à des changements rapides et profonds affectant les organismes vivants et leur environnement.

Cette année, le thème Système Terre met en avant de nouveaux développements sur le rôle du transport sédimentaire dans la forme des rivières (Popović et al.), la mobilité du chrome en zone minière (Bolaños-Benítez et al.), ainsi que le rôle des variations orbitales de la Terre sur les climats passés (Tardif et al.).

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

This year, the Earth System Science theme highlights new developments on the role of sediment transport in the shape of rivers (Popović et al.), chromium mobility in mining areas (Bolaños-Benítez et al.), as well the role of Earth's orbital variations on past climate (Tardif et al.).

sommaire/contents

#1

Comment le transport sédimentaire détermine la forme d'une rivière
How sediment load sets the shape of rivers

Les approches empiriques ne permettent pas de prédire la forme d'une rivière en fonction de son débit sédimentaire, car la mise en mouvement des sédiments est initiée par de petits écarts à l'équilibre. En outre, une rivière chargée de sédiments est soumise au « paradoxe du canal stable », qui prévoit que la mobilité des sédiments entraîne inexorablement une érosion de ses berges. Un lit qui ne présente pas de signes d'érosion semble donc incompatible avec le transport des sédiments. En 1978, Gary Parker a émis l'hypothèse que les frottements à l'intérieur de l'écoulement pouvaient maintenir les berges d'une rivière tout en permettant le mouvement des sédiments le long d'un fond plat. Cette théorie n'avait jamais été testée expérimentalement du fait de la complexité des écoulements turbulents.

Des chercheurs de l'IPGP ont utilisé un analogue simple constitué de petites rivières créées par l'écoulement d'un fluide visqueux sur un lit de microbilles de plastique, comprenant la possibilité d'ajuster indépendamment le débit du fluide et l'apport en particules. La viscosité élevée du fluide rend l'écoulement laminaire, simplifiant considérablement le problème par rapport à un écoulement turbulent.

Ces expériences ont montré une variation de la forme du lit de la rivière analogique en fonction du débit des particules charriées. Les scientifiques ont proposé un modèle mathématique reproduisant cette forme et prédisant la distribution des grains en mouvement sur le lit fluvial. Les rivières expérimentales étant proches du seuil de mouvement des sédiments, l'intensité avec laquelle elles transportent les sédiments ne peut pas dépasser une valeur seuil, provoquant ainsi un élargissement de la rivière au fur et à mesure que la charge sédimentaire augmente. Cette valeur limite est déterminée par le frottement visqueux au sein de l'écoulement. Pour de faibles débits sédimentaires, les chercheurs ont mis en évidence un régime pour lequel la théorie de Parker n'est plus valable et où la forme de la rivière est indépendante du débit sédimentaire. Les sédiments mobilisés se comportent alors comme des molécules gazeuses dans un champ gravitationnel et leur distribution obéit à celle de Boltzmann. Ce nouveau régime fait le lien entre les rivières transportant peu de sédiments et celles obéissant au régime de Parker, qui en transportent beaucoup.

Empirical approaches cannot predict the shape of a river as a function of its sediment flow, because sediment movement is initiated by small deviations from equilibrium. Moreover, a river that carries sediment is subject to the "stable channel paradox", which predicts that sediment motion inexorably leads to erosion of its banks. A bed that shows no signs of erosion thus seems incompatible with sediment transport. In 1978, Gary Parker hypothesized that friction within the flow could maintain the banks of a river while allowing the motion of sediment along a flat riverbed. This theory had never been tested experimentally due to the complexity of turbulent flows.

IPGP researchers used a simple analog model consisting of small rivers created by the flow of a viscous fluid over a bed of plastic microbeads, including the ability to independently adjust the flow rate of the fluid and the supply of particles. The high viscosity of the fluid makes the flow laminar, greatly simplifying the problem compared to turbulent flow.

These experiments showed a variation in the shape of the riverbed as a function of the flow rate of the sediments carried along. The researchers proposed a mathematical model reproducing this shape and predicting the distribution of moving grains on the riverbed. As the experimental rivers are close to the threshold for sediment transport, the intensity with which they transport sediment cannot exceed a threshold value, causing the river to widen as the sediment load increases. This limit value is determined by the viscous friction within the flow. For low sediment flows, the researchers have identified a regime for which Parker's theory is no longer valid and where the shape of the river is independent of the sediment flow. The mobilized sediments then behave like gas molecules in a gravitational field and their distribution follows the Boltzmann distribution. This new regime bridges the gap between rivers carrying little sediment and those following Parker's regime, which carry much sediment.

Rivière modélisée en laboratoire (largeur de l'image : 1 m).
River modeled in the laboratory (width: 1 m).

Le modèle développé dans cette étude explique ainsi comment une rivière change de forme en réponse à sa charge sédimentaire. En l'inversant, il pourrait être possible d'estimer le débit sédimentaire d'une rivière en mesurant sa forme. Si cette théorie était vérifiée en conditions naturelles, elle permettrait d'évaluer le débit sédimentaire quittant un bassin versant, une variable notoirement difficile à mesurer sur le terrain.

The model developed in this study explains how a river adjusts its shape in response to its sediment load. By inverting it, it might be possible to estimate the sediment flow of a river by measuring its shape. If this theory were to be validated under natural conditions, it would allow us to estimate the flux of sediment that leaves a catchment, a variable notoriously difficult to measure in the field.

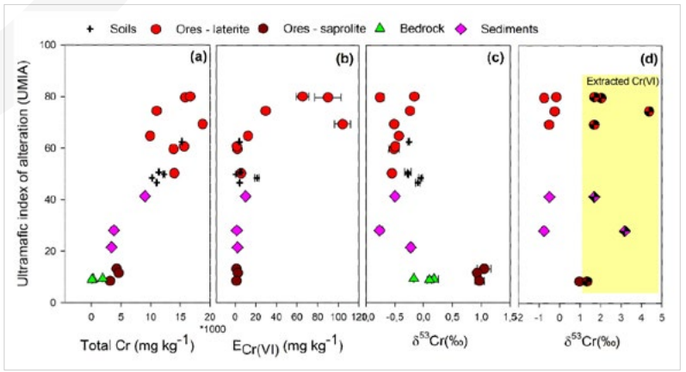
Popović P., Devauchelle O., Abramian A. & Lajeunesse E.
Sediment load determines the shape of rivers
PNAS, 118(49):e2111215118, 2021
DOI 10.1073/pnas.2111215118
Contact popovic@ipgp.fr

#2

Étude isotopique de la mobilité du chrome en zone minière
Isotopic study of the mobility of chromium in mining zones

Les roches ultramafiques, telles que les péridotites, sont caractérisées par des concentrations de chrome (Cr) élevées. Ce dernier, bien que peu soluble dans l'eau, peut naturellement migrer des sols vers les nappes phréatiques. Il est probable que les activités minières et métallurgiques accélèrent ce lessivage et augmentent significativement les concentrations de chrome dans les eaux. L'abondance des isotopes du chrome dans l'environnement peut être utilisée comme traceur des apports anthropiques de cet élément.

Ultramafic rocks, such as peridotites, are characterized by high concentrations of chromium (Cr). Although not very soluble in water, chromium can naturally migrate from soils to groundwater. It is likely that mining and metallurgical activities accelerate this release and significantly increase the concentrations of chromium in waters. The abundance of chromium isotopes in the environment can be used as a tracer of anthropogenic inputs of this element.



Variation de l'indice ultramafique d'altération (UMIA, qui caractérise la perte en éléments solubles par le sol durant son altération) en fonction de **(a)** la teneur en chrome totale, **(b)** la taille du réservoir de chrome échangeable ($E_{Cr(VI)}$), **(c)** la composition isotopique du chrome de tous les échantillons (exprimée en échelle $\delta^{53}Cr$, en ‰ d'écart du rapport $^{53}Cr/^{52}Cr$ comparé à un standard international) et **(d)** la composition isotopique du chrome des échantillons totaux et du chrome hexavalent Cr(VI) extrait chimiquement.

Variation in the ultramafic index of alteration (UMIA, which characterizes the loss of soluble elements from the soil during weathering) as a function of **(a)** total chromium content, **(b)** size of the exchangeable chromium pool ($E_{Cr(VI)}$), **(c)** chromium isotopic composition of all samples (expressed on the $\delta^{53}Cr$ scale, in ‰ of difference on the ratio $^{53}Cr/^{52}Cr$ compared to an international standard), and **(d)** chromium isotopic composition of all samples chemically extracted hexavalent chromium Cr(VI).

Des travaux menés par des chercheurs de l'IPGP et leurs collègues ont tenté d'estimer le rejet de chrome dans les eaux de surface et souterraines du gisement de minerai de nickel latéritique - les latérites sont des sols profonds caractéristiques des régions tropicales - de Barro Alto (Brésil, État de Goiás), ainsi que la composition isotopique du chrome associée. Parmi tous les échantillons collectés, les oxydes de fer ont été

Work conducted by IPGP researchers and their colleagues attempted to estimate the release of chromium into surface and groundwater from the lateritic nickel ore deposit - laterites are deep soil characteristic of tropical regions - at Barro Alto (Brazil, State of Goiás), along with the associated chromium isotopic composition. Iron oxides were identified as the main mineral phase containing chromium in the ores. Among all the

sommaire/contents

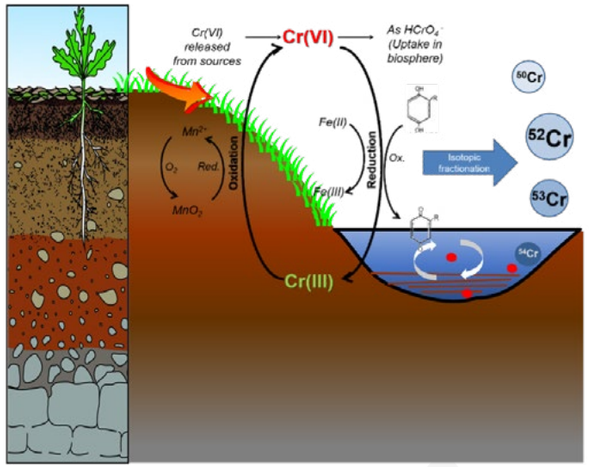


Schéma des processus d'altération des sols ultramafiques et des fractionnement isotopiques associés.

Sketch of ultramafic soil weathering processes and associated isotopic fractionation.

identifiés comme étant la principale phase minérale contenant du chrome dans les minerais dans la mesure où ils contiennent les quantités les plus élevées de chrome chimiquement et isotopiquement échangeable. Celui-ci est également 30 fois plus mobile dans les horizons de surface du sol que dans les couches profondes, évolution associée à un enrichissement en isotopes lourds du chrome. De plus, le chrome extrait chimiquement [ECr(VI)-KH_2PO_4] présente un enrichissement encore plus important en isotopes lourds du chrome, semblable à celui mesuré dans les eaux de surface dans et autour de la mine.

Cette étude montre que l'enrichissement en isotopes lourds du chrome dans les eaux de surface et les eaux souterraines est lié à la libération de chrome hexavalent Cr(VI), elle-même due à l'oxydation du chrome trivalent Cr(III) dans les phases solides du sol et des sédiments. Une partie de l'enrichissement en chrome est due au lessivage naturel des sols, mais leur dégradation liée aux activités minières joue aussi un rôle important en accélérant ce phénomène. Sur la base des différences de signatures isotopiques du chrome observées, les scientifiques proposent d'utiliser les isotopes du chrome dans les études environnementales pour suivre la libération de cet élément par les activités minières.

samples collected, they contain the highest amounts of chemically and isotopically exchangeable chromium. Chromium is also 30 times more mobile in the surface soil horizons than in the deep layers, a trend associated with enrichment in heavy chromium isotopes. In addition, chemically extracted chromium [ECr(VI)-KH_2PO_4] shows even greater enrichment in heavy chromium isotope, similar to that measured in surface waters in and around the mine.

This study shows that the enrichment in heavy chromium isotopes in surface and groundwater is related to the release of hexavalent chromium, itself due to the oxidation of trivalent chromium in the solid phase of the soils and sediments. Part of the chromium enrichment is due to natural soil leaching, but soil mining-related degradation also plays an important role in accelerating this phenomenon. Based on the observed differences in chromium isotopic signatures, scientists propose to use chromium isotopes in environmental studies to monitor the release of this element by mining activities.

Bolaños-Benítez V., Van Hullebusch E.D., Birck J.-L., Garnier J., Lens P.N.L., Tharaud M., Quantin C. & Sivry Y.
Chromium mobility in ultramafic areas affected by mining activities in Barro Alto massif, Brazil: An isotopic study
Chemical Geology, 561, 120000, 2021
DOI 10.1016/j.chemgeo.2020.120000
Contact vanhullebusch@ipgp.fr

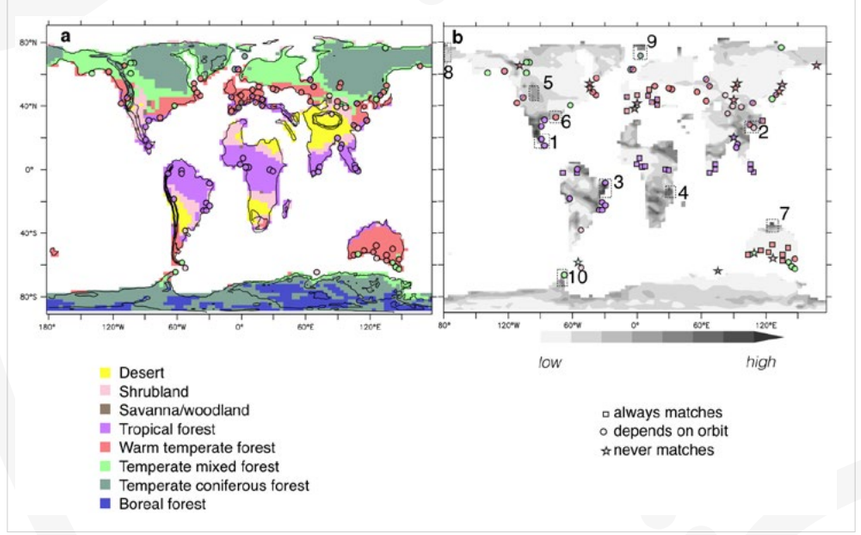
sommaire/contents

#3

Les variations orbitales comme forçage majeur du climat Éocène-Oligocène
Orbital variations as a major forcing of the Eocene-Oligocene climate

La reconstruction de l'histoire climatique de la Terre repose notamment sur l'interprétation des assemblages floristiques des archives sédimentaires. Hormis quelques bassins dans lesquels une préservation exceptionnelle est associée à de très forts taux de sédimentation, l'âge de ces flores fossiles n'est généralement connu qu'à quelques centaines de milliers d'années près sur l'échelle géologique. Or, la variation des paramètres orbitaux de la Terre entraîne une forte variabilité du climat sur des échelles de temps plus courtes, ce qui pose la question de la représentativité climatique des assemblages floristiques comme indicateurs de l'évolution du climat. Reflètent-ils le climat « moyen » d'un étage géologique donné ou bien le climat d'une période extrême lié à une configuration orbitale particulière ? Réciproquement, quelle est la variabilité climatique et floristique induite par les fluctuations de l'orbite terrestre ?

The reconstruction of the climatic history of the Earth relies, among other approaches, on the interpretation of floristic assemblages found in sedimentary archives. Except for a few basins whose exceptional preservation is associated with very high sedimentation rates, the age of these fossil floras is generally known to within a few hundred thousand years on the geological scale. However, the variation of the Earth's orbital parameters leads to a strong variability of the climate on shorter time scales. This raises the question of the climatic representativeness of floristic assemblages as indicators of climate change. Do they reflect the "average" climate of a given geological stage or the climate of an extreme period linked to a specific orbital configuration? Conversely, what is the climatic and floristic variability induced by the fluctuations of the Earth's orbit?



(À gauche) Grands biomes simulés pour l'Éocène en utilisant des paramètres orbitaux modernes. **(À droite)** Régions de forte variabilité du couvert végétal (en gris foncé) sous différentes configurations orbitales. Les symboles représentent les biomes de l'Éocène tardif provenant de la compilation de Pound et Salzman (2017). Le même code couleur est appliqué pour ces symboles et pour les aires de biomes dans la carte de gauche, et les symboles indiquent la correspondance avec les biomes simulés sous différents forçages orbitaux. Alors qu'au moins 53% de ces biomes sont bien simulés, la prise en compte de la variabilité orbitale fait monter le taux d'estimation à 83%, ce qui représente une nette amélioration.

(Left figure) World Eocene biomes simulated using modern orbital parameters. **(Right figure)** The regions of high variability in vegetation cover (in dark gray shading) under different orbital configurations. Overlaid symbols are late Eocene biomes from the Pound and Salzman (2017) compilation. The same color coding is applied for these data points as for biome areas in the left map, and symbols indicate the match with simulated biomes under different orbital forcing. While at least 53% of the biomes are well simulated, taking orbital variability into account increases the estimation rate to 83%, which represents a clear improvement.

Pour répondre à ces questions, des chercheurs de l'IPGP et leurs collègues se sont intéressés à la transition Éocène-Oligocène (TEO) qui s'est produite il y a 34 Ma et pour laquelle des études récentes ont montré une forte sensibilité du climat aux variations orbitales. La TEO est marquée par des bouleversements climatiques (refroidissement global) et environnementaux importants (englacement de l'Antarctique, disparition de nombreuses espèces) associés à une baisse de la teneur en CO_2 de l'atmosphère. Cette époque est aussi caractérisée par la « Grande Coupure », qui désigne un remplacement massif des faunes endémiques européennes par des faunes en provenance d'Asie.

Pour estimer le climat moyen et sa variabilité en réponse au forçage orbital pendant la TEO, les scientifiques ont utilisé le modèle de « système-Terre » IPSL-CM5A2 et le modèle de surface continentale ORCHIDEE. Ils ont évalué la diversité des assemblages floristiques passés en réponse aux variations orbitales à la TEO. Leur étude montre que la prise en compte de la variabilité orbitale améliore nettement la correspondance des climats simulés avec les assemblages floristiques et permet de proposer une cartographie globale de la sensibilité de la végétation au forçage orbital pour l'Éocène et l'Oligocène. Elle souligne également l'impact conjugué de la baisse de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère et des variations de l'obliquité sur la fragmentation des corridors bioclimatiques en Anatolie et en Sibérie, empruntés par les mammifères asiatiques lors de la « Grande Coupure ». Ce travail montre enfin qu'à concentration en CO_2 constante, la végétation des régions tropicales pourrait avoir oscillé entre forêt tropicale humide et milieu arbustif ouvert (voire localement zones arides) et confirme les recherches récentes suggérant l'existence dès l'Éocène d'une mousson périodique sur une région correspondant à la Chine orientale actuelle. Cette amplitude environnementale est liée à l'effet de la précession des équinoxes, et dans une moindre mesure à celui de l'obliquité, sur les gradients de température.

To answer these questions, IPGP researchers and their colleagues examined the Eocene-Oligocene transition (EOT) which occurred 34 My ago and for which recent studies have shown a high sensitivity of climate to orbital variations. The EOT is marked by major climatic (global cooling) and environmental upheavals (freezing of Antarctica, extinction of many species) associated with a decrease in atmospheric concentration of CO_2. This period is also characterized by the "*Grande Coupure*", which refers to a massive replacement of endemic European fauna by fauna from Asia.

To estimate both climate and vegetation variability in response to orbital forcing during the EOT, scientists used the IPSL-CM5A2 "Earth System" model and the ORCHIDEE continental surface model. We assessed the diversity of past floristic assemblages in response to orbital variations at the EOT. Their study shows that accounting for orbital variability significantly improves the correspondence of simulated climates with floristic assemblages and allows us to provide a global mapping of vegetation sensitivity to orbital forcing for the Eocene and Oligocene. It also highlights the combined impact of decreasing CO_2 concentration and obliquity variations on the fragmentation of bioclimatic corridors in Anatolia and Siberia, used by Asian mammals during the "*Grande Coupure*". Finally, their work shows that at constant CO_2 concentration, the vegetation of tropical regions could have oscillated between tropical rainforest and open shrubland (and even locally arid zone) and confirms recent work suggesting the existence of a periodic monsoon over a region corresponding to present-day eastern China. This environmental amplitude is linked to the effect of the precession of the equinoxes and, to a lesser extent, to that of obliquity on temperature gradients.

Tardif D., Toumoulin A., Fluteau F., Donnadieu Y., Le Hir G., Barbolini N., Licht A., Ladant J.-B., Sepulchre P., Viovy N., Hoorn C., Dupont-Nivet G.
Orbital variations as a major driver of climate and biome distribution during the greenhouse to icehouse transition
Science Advances, 7:eabh2819, 2021
DOI 10.1126/sciadv.abh2819
Contact fluteau@ipgp.fr

Origines
Origins

Les planètes du Système solaire présentent des compositions et structures particulièrement variées, aux origines encore largement débattues. L'étude des processus primordiaux s'avère essentielle pour comprendre comment ils ont pu contrôler à la fois la dynamique de formation, la composition et l'évolution de ces astres, mais également la chimie prébiotique et les conditions environnementales relatives au développement des premiers organismes vivants sur Terre, voire sur d'autres planètes et exoplanètes. L'IPGP est l'un des rares établissements où des scientifiques de multiples domaines de recherche tels que la géologie, la géochimie, la cosmochimie, la géophysique, la géobiologie et l'astrophysique peuvent travailler ensemble sur le décryptage de ces questions fondamentales.

Cette édition 2021 du rapport annuel met en avant de nouveaux résultats qui nous éclairent sur l'origine de la subduction terrestre (Antonelli et al.) et le devenir du carbone organique crustal pendant la subduction (Bouilhol et al.) et fournissent des nouveaux modèles pour expliquer la perte de volatiles de la Lune (Charnoz et al.).

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

This 2021 edition of the annual report highlights new results that shed light on the origin of terrestrial subduction (Antonelli et al.) and the fate of crustal organic carbon during subduction (Bouilhol et al.) and provide new models to explain the loss of volatiles from the Moon (Charnoz et al.).

sommaire/contents

#1

Un nouveau pas vers le décryptage du cycle du carbone organique profond

A new step towards deciphering the deep organic carbon cycle

Il a longtemps été admis que, passés les premiers kilomètres de la lithosphère, le carbone organique que l'on pensait essentiellement formé par des processus biologiques de surface, était finalement transformé en carbone inorganique (carbonates et/ou dioxyde de carbone) et en graphite sédimentaire du fait de l'augmentation de la température et de la pression. Les techniques d'imagerie développées par l'équipe de géomicrobiologie de l'IPGP, pour la première fois appliquées à des échantillons de zones de subduction, ont permis une caractérisation pétrologique de haute résolution des phases carbonées contenues dans les roches éclogitiques du massif alpin de Zermatt Zaas (Suisse). Cette approche a mis en évidence des composés organiques, différents du graphite habituellement observé dans les métasédiments des massifs alpins, piégés sous forme d'inclusions dans des minéraux de haute pression.

It has long been accepted that, beyond the first few kilometers of the lithosphere, organic carbon, thought to be formed mainly by surface biological processes, was ultimately transformed into inorganic carbon (carbonates and/or carbon dioxide) and sedimentary graphite as a result of increasing temperature. Imaging techniques developed by IPGP's geomicrobiology team, applied for the first time to subduction zone samples, allowed a high-resolution petrological characterization of the carbonaceous phases contained in the eclogitic rocks of the Zermatt Zaas Alpine massif (Switzerland). This approach allowed to image organic compounds, different from the graphite usually observed in the metasediments of the alpine massifs, trapped in the form of inclusions in high-pressure minerals.

Échantillonnage des serpentinites de Zermatt Zaas (Alpes suisses).
Sampling serpentinites from Zermatt Zaas (Swiss Alps).

Des analyses réalisées dans le cadre d'une collaboration internationale révèlent que les isotopes du Sr, C et O seraient piégés lors de la déshydratation des serpentinites de la plaque subduite. Ces vestiges de haute pression témoignent ainsi du recyclage du carbone organique vers le manteau profond pendant la subduction, tandis que le carbone inorganique serait préférentiellement mobilisé dans la phase fluide sous forme de CO_2 et migrerait vers la surface. Ce comportement découplé du carbone inorganique et organique pendant la subduction a de fortes implications pour le cycle profond du carbone qui joue un rôle primordial à l'échelle de la planète, notamment pour maintenir des conditions propices à la vie sur Terre.

The used of Sr, C and O isotopes, carried out within the framework of an international collaboration, shows that these compounds were formed during the dehydration of serpentinites in the slab. These high-pressure relicts support a preferential recycling of organic carbon "en route" to the deep mantle during subduction, whereas inorganic carbon would be preferentially mobilized in the fluid phase as CO_2 and would migrate towards the surface. This decoupled behavior of inorganic and organic carbon during subduction has strong implications for the deep carbon cycle, which plays a key role on a global scale, notably in maintaining conditions conducive to life on Earth.

Bouilhol P., Debret B., Inglis E.C. et al.
Decoupling of inorganic and organic carbon during slab mantle devolatilisation.
Nat Commun 13, 308, 2022
DOI 10.1038/s41467-022-27970-0
Contact debret@ipgp.fr

#2

La subduction déjà à l'œuvre sur Terre il y a 4 milliards d'années

Subduction was already at work on Earth 4 billion years ago

La Terre est la seule planète connue de notre système solaire présentant une tectonique de plaques active et une croûte dite continentale, qui se différencie de la croûte océanique par sa haute teneur en silice. La tectonique des plaques, ou dérive des continents, se caractérise par la création au niveau des dorsales de croûte océanique et par l'enfouissement de cette dernière sous les continents, dans les zones dites de

The Earth is the only known planet in our solar system with active plate tectonics and a continental crust, which differs from the oceanic crust in its high silica content. Plate tectonics, or continental drift, is characterised by the creation of oceanic crust at ridges. This crust slides under the continental crust in what are known as subduction zones. Many geological phenomena, such as earthquakes and certain volcanic

subduction. De nombreux phénomènes géologiques, comme les séismes et certaines éruptions volcaniques, sont liés à ce processus tectonique ayant participé à faire évoluer la surface terrestre jusqu'à la morphologie que nous lui connaissons actuellement.

Mais la période de l'histoire de la Terre à partir de laquelle la subduction est devenue opérationnelle reste discutée au sein de la communauté scientifique. En effet, les températures, plus élevées au sein de la Terre primitive, auraient pu retarder sa mise en place au cours du premier milliard d'années de notre planète. Les témoins des processus à l'œuvre sur la jeune Terre sont rares, précisément du fait du recyclage de la croûte par la tectonique des plaques. Toutefois, des granitoïdes très anciens sont toujours présents à la surface du globe et représentent des échantillons précieux de la formation des premiers continents.

Une équipe dirigée par des chercheurs de l'IPGP a étudié les abondances des isotopes du calcium dans des échantillons de granitoïdes anciens, grâce à une technique d'analyse géochimique de pointe, permettant d'apporter deux nouvelles informations sur les processus profonds et les conditions environnementales qui régnaient sur la Terre primitive.

L'étude montre que les roches granitoïdes formant les plus anciens continents connus, il y a 4 milliards d'années, ont été produits à des gradients géothermiques compris entre 500 et 750°C/GPa, les mêmes que ceux observés dans certaines zones de subduction modernes. Ceci indique que des processus de subduction étaient déjà en cours à cette époque.

En outre, la signature des isotopes du calcium dans d'autres échantillons de granitoïdes, vieux de 3,8 milliards d'années, démontre que la croûte océanique recyclée par subduction pour former ces granitoïdes contenait des sédiments carbonatés océaniques. Des carbonates marins étaient donc déjà présents à la surface de la Terre à cette période. Ces résultats précèdent de 100 millions d'années les unités carbonatées océaniques les plus anciennes préservées aujourd'hui.

Cette découverte s'avère particulièrement importante car pour que ces carbonates précipitent et sédimentent au fond des océans, l'atmosphère terrestre devait contenir une grande quantité de CO_2. Ce qui correspond aux modèles atmosphériques proposés aujourd'hui pour expliquer les températures nécessaires à la présence d'eau liquide sur la Terre primitive, alors que la luminosité du soleil était plus faible à cette époque (paradoxe du soleil jeune).

eruptions, are linked to this tectonic process, which has participated in making the Earth's surface evolve into the form we know today.

The period in the Earth's history at which subduction became operational is nonetheless still open to debate within the scientific community. Indeed, the higher temperatures in the early Earth could have delayed its emergence during the first billion years of our planet. There is little evidence of the processes at work on the young Earth precisely because the crust was being recycled by plate tectonics. However, very old granitoids are still present on the Earth's surface, and represent valuable samples from the formation of the first continents.

A team led by IPGP researchers has studied calcium isotope abundances in ancient granitoid samples using a state-of-the-art geochemical analysis technique, providing two new insights into the deep processes and environmental conditions that prevailed on the early Earth.

Their research shows that the granitoid rocks forming the oldest known continents some 4 billion years ago, were produced at geothermal gradients between 500 and 750°C/GPa, which are the same as those observed in some present-day subduction zones. This indicates that subduction processes were already under way at that time.

In addition, the calcium isotope signature in other 3.8-billion-year-old granitoid samples demonstrates that the oceanic crust recycled by subduction to form these granitoids contained oceanic carbonate sediments. Marine carbonates were therefore already present on the Earth's surface at this time. These results predate the oldest oceanic carbonate units preserved today by 100 million years.

This discovery is particularly important because for these carbonates to precipitate and settle on the ocean floor, the Earth's atmosphere had to contain a large amount of CO_2. This corresponds to the atmospheric models proposed today to explain the temperatures necessary for the presence of liquid water on the early Earth, at a time when the Sun's luminosity was lower (the faint young Sun paradox).

Granitoïdes archéens de Yellowknife, Canada.
Archaeal granitoids from Yellowknife, Canada.

Cette étude confirme que les processus de subduction et les précipitations de carbonates océaniques ont commencé à se produire il y a au moins 4 milliards d'années, suggérant que la tectonique des plaques et le cycle silicate-carbonate ont commencé très tôt dans l'histoire de la Terre.

This research confirms that subduction processes and oceanic carbonate precipitation began to occur at least 4 billion years ago, suggesting that plate tectonics and the silicate-carbonate cycle began very early in Earth's history.

Antonelli M.A., Kendrick J., Yakymchuk C., Guitreau M., Mittal T., Moynier F.
Calcium Isotope evidence for early Archaean carbonates and subduction of oceanic crust.
Nat Commun 12, 2534, 2021
DOI 10.1038/s41467-021-22748-2
Contact moynier@ipgp.fr

#3

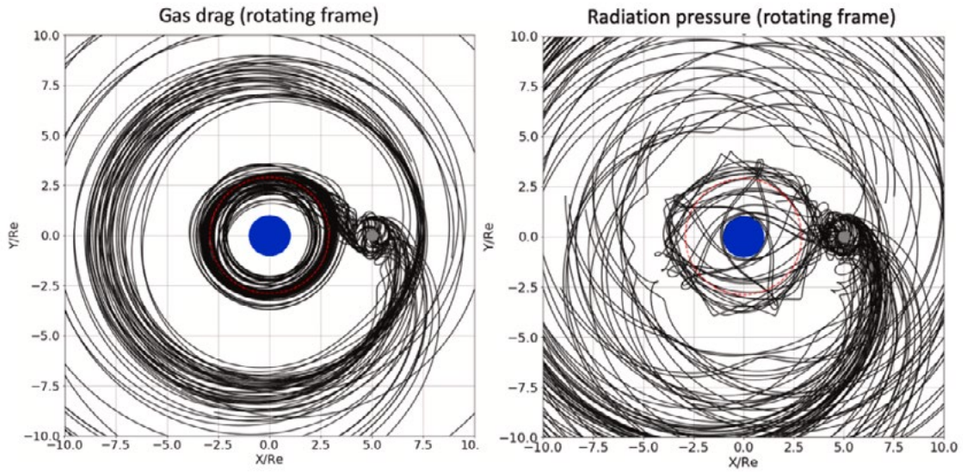
Dévolatilisation de la Lune nouvellement formée sous l'effet des forces de marée terrestres
Devolatilization of a young Moon due to the tidal forces of the Earth

L'étude des échantillons récupérés sur la Lune il y a 50 ans lors des différentes missions Apollo a révélé que les roches lunaires sont généralement très appauvries en éléments volatils (éléments qui se condensent à une température relativement basse tels que le sodium, le zinc et le potassium). Des études isotopiques ultérieures, réalisées pour la plupart à l'IPGP, ont mis en lumière le fait que cet appauvrissement a dû se produire par évaporation pendant ou après la formation de la Lune suite à un impact géant très chaud. Toutefois, les simulations ont montré qu'il était impossible pour ces éléments volatils de s'échapper du système Terre-Lune car leurs atomes sont trop massifs (par rapport à l'hydrogène, par exemple), laissant ouverte la question de leur destination finale.

The study of samples recovered from the Moon 50 years ago during the Apollo missions revealed that lunar rocks are generally highly depleted in volatile elements (elements that condense at a relatively low temperature such as sodium, zinc and potassium). Later isotopic studies, mostly realized at the IPGP, have demonstrated that this depletion must have occurred by evaporation during or following the formation of the Moon in a hot giant impact. However, simulations showed that it was not possible for these volatile elements to escape the Earth-Moon system because these atoms are too massive (compared to hydrogen, for example), leaving open the question of their final destination.

Des chercheurs de l'IPGP proposent un nouveau modèle validant le scénario de la perte par évaporation. Au moment de la formation de la Lune, celle-ci était chaude et entièrement fondue et, plus important encore, elle était 15 fois plus proche de la Terre qu'elle ne l'est aujourd'hui (seulement quatre rayons terrestres). Ainsi, l'attraction gravitationnelle de la Terre, en plus de l'évaporation de la Lune en fusion, aurait participé à l'extraction des substances volatiles de notre jeune satellite. Ce nouveau modèle indique également que ces éléments volatiles ne se sont pas perdus dans l'espace, mais qu'ils se seraient réimplantés sur Terre.

IPGP researchers propose a new model validating the evaporation loss scenario. When the moon was just formed, it was hot and fully molten, and, even more important, it was 15 times closer to the Earth than it is today (only four Earth radii). Thus, the strong gravitational pull of the Earth, in addition to the evaporation from the molten Moon, would have been involved in the extraction of the volatiles from our young satellite. This new model also indicates that these volatile elements were not lost in space, but were re-implanted on Earth.



Simulation de la perte d'atmosphère de la Lune primitive. La Terre est en bleu au milieu, la lune est en gris sur la droite. Les lignes noires représentent la trajectoire du gaz qui s'échappe de la Lune et qui n'y revient jamais. Soit le gaz s'en va à l'extérieur, soit le gaz est capturé par la Terre.
Simulation of the loss of atmosphere of the primitive moon. The Earth is in blue in the middle, the moon is in grey on the right. The black lines represent the trajectory of the gas escaping from the Moon and never returning. Either the gas goes outside or the gas is captured by the Earth (Charnoz et al., 2020).

Vue d'artiste de la lune primitive recouverte d'un océan de magma juste après sa formation.
Artist's view of the primitive moon covered by an ocean of magma just after its formation.

Charnoz S., Sossi P. A., Lee Y.-N., Siebert J., Hyodo R., Allibert L., Pignatale F. C., Landeau M., Oza A. V., Moynier F.
Tidal pull of the Earth strips the proto-Moon of its volatiles
Icarus, 364, 114451, 2021
DOI 10.1016/j.icarus.2021.114451
Contact charnoz@ipgp.fr

Observatoires
Observatories

sommaire/contents

Observatoires magnétiques
Magnetic observatories

Le service des observatoires magnétiques de l'IPGP fournit des observations au sol du champ magnétique terrestre ainsi que des produits dérivés. Il fait partie du Bureau Central de Magnétisme Terrestre (BCMT) qui est un Service National d'Observation (SNO) du CNRS-INSU géré par l'IPGP, auquel participe aussi le service d'observation magnétique de l'EOST à Strasbourg. L'IPGP maintient onze observatoires, en collaboration avec des institutions françaises et internationales : l'observatoire magnétique national de Chambon-la-Forêt et ceux de Borok (Russie), Dalat (Vietnam), Île de Paques (Chili), Edéa (Cameroun), Kourou (Guyane), Lanzhou (Chine), Sop/Niakhar (Sénégal), Phu Thuy (Vietnam), Pamatai (Polynésie française) et Tamanrasset (Algérie). Ils sont opérés par des observateurs spécifiquement formés pour effectuer les mesures d'étalonnage hebdomadaires et font partie du réseau INTERMAGNET, une organisation internationale d'observatoires magnétiques.

The IPGP's Magnetic Observatories Service provides ground-based observations of the Earth's magnetic field and derived products. It is part of the "Bureau Central de Magnétisme Terrestre" (BCMT), a CNRS-INSU National Observation Service (SNO) under the IPGP's responsibility. The magnetic observation service of the EOST in Strasbourg also contributes to the BCMT. The IPGP maintains 11 observatories in cooperation with French and international institutions: the National Magnetic Observatory in Chambon-la-Forêt and those in Borok (Russia), Dalat (Vietnam), Easter Island (Chile), Edéa (Cameroon), Kourou (French Guiana), Lanzhou (China), M'bour/Sop (Senegal), Phu Thuy (Vietnam), Pamatai (French Polynesia) and Tamanrasset (Algeria). They are operated by observers specifically trained to perform weekly calibration measurements and are part of the INTERMAGNET network, an international organization of magnetic observatories.

Les observations effectuées sont à la fois d'une grande précision et d'une haute stabilité à long-terme.

The observations made are both extremely precise and highly stable over time.

Les observatoires fournissent des données temps-réel, quasi-définitives et définitives, qui sont distribuées sous la forme de données secondes, de moyennes sur une minute ou sur de plus longues périodes (heure, jour, mois, année). Ces données sont distribuées via les portails web du BCMT et d'INTERMAGNET, mais aussi à travers les centres de données mondiaux pour les données magnétiques (World Data Centres - WDC) au Royaume-Uni, aux USA et au Japon. Ces données sont utilisées en premier lieu pour des activités de recherche (dynamique du noyau liquide de la Terre, conductivité du manteau, structure de la croûte, dynamiques de l'ionosphère et de la magnétosphère), mais également comme des références d'orientation pour l'industrie et comme outils pour le suivi de la météorologie de l'espace.

The observatories provide real-time, near-definitive and definitive data, which are given as seconds, one-minute averages or longer periods (an hour, day, month or year). These data are distributed via the BCMT and INTERMAGNET web portals, as well as through the World Data Centres (WDCs) for magnetic data in the UK, USA and Japan. The data are primarily used for research (dynamics of the Earth's liquid core, mantle conductivity, crustal structure, dynamics of the ionosphere and magnetosphere), but also as references to guide industry and as tools for monitoring space weather.

sommaire/contents

Activités en 2021
Activities in 2021

Réunion du conseil scientifique du BCMT
Meeting of the BCMT's Scientific Council

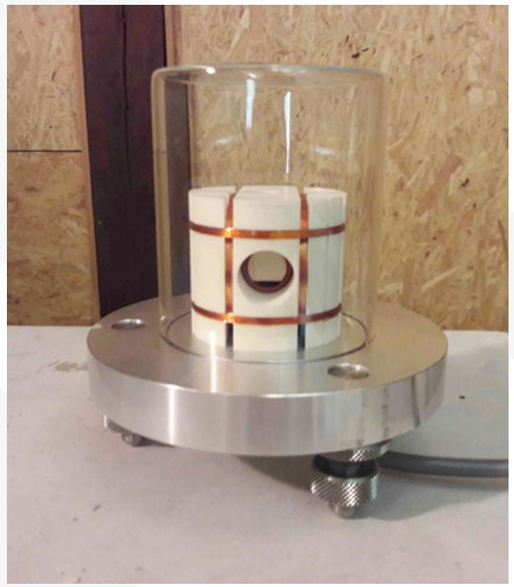
Le 10 juin 2021, le conseil scientifique du BCMT, composé de neuf scientifiques, dont cinq travaillant dans des institutions étrangères, s'est réuni pour effectuer la revue des activités des services d'observation magnétiques des deux dernières années, discuter des objectifs de développement des services et recommander des actions spécifiques si nécessaire. Le conseil apprécie la qualité du réseau des observatoires magnétiques français, ainsi que la construction de nouveaux instruments vectoriels de mesure.

On 10 June 2021, the BCMT's Scientific Council, made up of nine scientists, five of whom work in foreign institutions, met to review the activities of the magnetic observation services over the last two years, discuss the goals in terms of service development and recommend specific actions if necessary. The council noted with approval the quality of the French magnetic observatory network, and the construction of new vector measurement instruments.

Production des nouveaux magnétomètres vectoriels digitaux de l'IPGP
Production of the IPGP's new digital vector magnetometers

Le réseau d'observatoires magnétiques de l'IPGP utilise comme instrument principal le magnétomètre vectoriel VM391, pour lequel la mesure magnétique se fait entièrement par des circuits analogiques. Puis une numérisation, en bout de chaine, permet d'obtenir la valeur de champ magnétique. Démarrée il y a quelques années, la modernisation de cet instrument

The IPGP's network of magnetic observatories uses the VM391 vector magnetometer as its main instrument, the magnetic measurements being performed entirely by analogue circuits. The magnetic field value is then digitized at the end of the processing chain. Modernization of this instrument began a few years ago and was completed in 2021. First of all, the electronics



Nouveau capteur du DVM19, couplé à une électronique moderne facilitant les opérations de configuration et calibration du magnétomètre.

The new DVM19 sensor, coupled with modern electronics for easier magnetometer configuration and calibration.

sommaire/contents

a été finalisée en 2021. En premier lieu, l'électronique a été revue en 2019 avec un traitement entièrement numérique à base de FPGA (« Field-Programmable Gate Array » - réseau de portes programmables in situ), qui a permis de limiter la dépendance en température de l'instrument, d'augmenter la dynamique de mesure, d'étendre la connectivité et de faciliter la configuration et la calibration. En 2020, une amélioration des logiciels intégrés a été effectuée avec la migration du système d'exploitation embarqué uCLinux vers le système temps réel FreeRTOS. La dernière étape a été l'élaboration du nouveau capteur en 2021, simplifié et toujours en céramique, qui conserve la stabilité en température de son prédécesseur mais s'avère plus facile à fabriquer. Le prototypage de ce capteur, dessiné à l'observatoire national de Chambon-la-Forêt, a été réalisé grâce au savoir-faire de l'atelier de mécanique de l'IPGP. Nommé DVM19, un premier modèle de ce magnétomètre vectoriel a été déployé sur la station magnétique de Clermont-Ferrand.

were upgraded in 2019 with fully digital processing based on field-programmable gate arrays (FPGAs), which has helped limit the instrument's temperature dependence, increase the measuring range, extend connectivity, and facilitate configuration and calibration. Then in 2020, the embedded software was also upgraded and the uCLinux embedded operating system migrated to the FreeRTOS real-time system. The final step was to develop a new, simplified sensor in 2021. Like its predecessor, it is ceramic and offers the same temperature stability while being easier to manufacture. This sensor, designed at the National Observatory in Chambon-la-Forêt, was prototyped with the invaluable expertise of the IPGP's mechanical workshop. Dubbed DVM19, the first model of this vector magnetometer has been deployed at the Clermont-Ferrand magnetic station.

Déploiement de la première station de variation en France
Deployment of France's first variation station

Vue d'ensemble de la station de variation, avec au premier plan un instrument de mesure scalaire au point de référence absolue de la station.

Overview of the variation station, with in the foreground a scalar measuring instrument at the station's absolute reference point.

À des fins d'études centrées sur le champ magnétique généré dans l'ionosphère, le service des observatoires magnétiques a développé un système d'observation léger, appelé station de variation. Ce type de station est basé sur le magnétomètre vectoriel développé à l'IPGP (DVM19), couplé avec un magnétomètre absolu scalaire classique. L'instrument vectoriel, placé sur un pilier stable en béton fibré, est particulièrement bien isolé au niveau thermique, assurant ainsi des mesures fiables. L'énergie est apportée par des panneaux solaires et les données sont transmises, sous cinq minutes, aux serveurs de données de l'IPGP. Les mesures de calibration seront effectuées annuellement, à la différence d'un observatoire classique où celles-ci doivent être réalisées chaque semaine. Le système peut servir de station de base pour des levés magnétiques régionaux, mais il a principalement pour but l'étude des variations locales et rapides du champ magnétique dues à différentes sources, dont le système de courant ionosphérique. La première station de variation, située sur le site du parc à thème Vulcania, à coté de Clermont-Ferrand, a été déployée en novembre 2021, suite à la signature d'une convention de collaboration entre les deux parties. Les données collectées sont disponibles via le portail du BCMT.

For studies focusing on the magnetic field generated in the ionosphere, the Magnetic Observatories Service has developed a simplified observation system known as a variation station. This type of station is based on the vector magnetometer developed at the IPGP (DVM19), coupled with a conventional absolute scalar magnetometer. The vector instrument has been placed on a stable, fibre-reinforced concrete pillar, and has excellent thermal insulation to ensure reliable measurements. Power is supplied by solar panels and the data are transmitted to the IPGP data servers within five minutes. Calibration measurements will be carried out annually, unlike with a conventional observatory where they have to be performed weekly. The system can be used as a base station for regional magnetic surveys, but its main purpose is to study rapid local variations in the magnetic field due to different sources, including the ionospheric current system. The first variation station, located at the Vulcania theme park near Clermont-Ferrand, was deployed in November 2021, following the signature of a cooperation agreement between the two parties. The data collected are available via the BCMT portal.

Collaborations, visites et accords
Joint projects, visits and agreements

Le Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP, École Polytechnique) a finalisé début 2021, sur la plateforme de l'observatoire magnétique national, ses opérations de calibration de l'instrument SCM (search-coil magnetometer) de la mission satellitaire JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer) de l'ESA.

In early 2021, the Plasma Physics Laboratory (LPP) at the École Polytechnique completed its work to calibrate the search-coil magnetometer (SCM) instrument of ESA's JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer) satellite mission using the National Magnetic Observatory's facilities.

Une convention entre l'IPGP et le parc naturel du domaine de Menez-Meur (Hanvec, Finistère), a été signée en juillet 2021, encadrant la collaboration autour de l'installation d'une station de variation sur ce site. Celle-ci permettra au Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM) d'avoir accès aux données d'une station de référence pour ses levés magnétiques en mer et d'évaluer le signal local dû aux marées et courants océaniques.

An agreement between the IPGP and the Menez-Meur Domain natural park (Hanvec, Finistère) was signed in July 2021, providing a framework for cooperation to establish a variation station at the site. This will enable the Hydrographic and Oceanographic Service of the French Navy (SHOM) to access data from a reference station for its marine magnetic surveys and assess the local signal due to tides and ocean currents.

Deux journées portes ouvertes ont été organisées sur le site de l'observatoire national début octobre dans le cadre de la Fête de la Science 2021, en collaboration avec le centre régional de promotion de la culture scientifique, technique et industrielle « Centre Sciences ». Cet évènement a été très bien accueilli avec environ 150 visiteurs de tous âges.

Two open days were organized at the National Observatory in early October as part of the 2021 French Science Festival, in cooperation with Centre Sciences, the regional centre for the promotion of scientific, technical and industrial culture. The event was a big hit, with around 150 visitors of all ages.

En savoir plus / Read more:

> www.bcmt.fr

> www.intermagnet.org

Observatoire GEOSCOPE
GEOSCOPE observatory

La mission de l'observatoire GEOSCOPE est de fournir des données sismologiques large bande validées, de haute qualité, aux communautés sismologiques française et internationale. GEOSCOPE est constitué d'un réseau de 33 stations sismologiques réparties dans le monde entier, toutes équipées pour fournir des données en temps réel. GEOSCOPE est en premier lieu dédié aux travaux de recherche : ses données sont ainsi utilisées pour l'étude de la structure et de la dynamique terrestres, pour l'analyse des sources sismiques, pour le suivi temporel des phénomènes de déformation ou encore pour la sismologie environnementale. L'observatoire fournit également ses données en temps réel aux organismes d'alerte des séismes et des tsunamis partout dans le monde.

La mission de l'observatoire est de fournir des données sismologiques large bande validées, de haute qualité, aux communautés sismologiques française et internationale.

GEOSCOPE est géré conjointement par l'IPGP à Paris et par l'EOST à Strasbourg. L'IPGP assure l'instrumentation et la maintenance de 23 stations, ainsi que la mise à disposition de toutes les données à travers son centre de données. Celles-ci sont également disponibles via les centres de données RESIF et IRIS et sont largement utilisées par la communauté scientifique, avec au moins 1500 publications mentionnant explicitement GEOSCOPE depuis 1982 (liste disponible sur le site de GEOSCOPE). Elles le sont aussi au sein de l'observatoire, afin de fournir des informations telles que l'estimation rapide des paramètres de sources d'un tremblement de terre (catalogue disponible sur le site de GEOSCOPE). L'équipe implique directement 11 personnes, 7 à l'IPGP et 4 à l'EOST (4 enseignants-chercheurs, 6 ingénieurs et un administratif).

The GEOSCOPE observatory is tasked with providing validated, high-quality broadband seismic data to seismological communities in France and abroad. GEOSCOPE is a network of 33 seismic stations around the world, all able to provide real-time data. GEOSCOPE is primarily dedicated to research: its data are used to study the Earth's structure and dynamics, to analyse seismic sources, to monitor deformation phenomena over time, and for environmental seismology. The observatory also provides real-time data to earthquake and tsunami early warning centres around the world.

The GEOSCOPE observatory is tasked with providing validated, high-quality broadband seismic data to seismological communities in France and abroad.

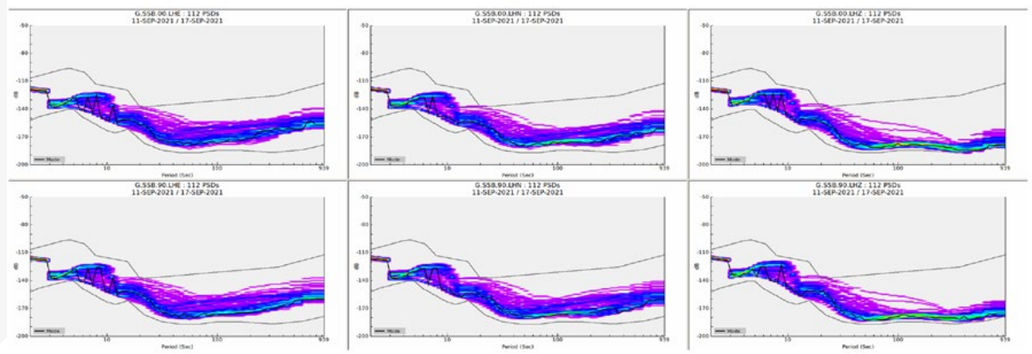
GEOSCOPE is jointly managed by the IPGP in Paris and the EOST in Strasbourg. The IPGP provides the instruments and maintains 23 stations, in addition to distributing all data through its data centre. These are also available via the RESIF and IRIS data centres and are widely used by the scientific community, with at least 1,500 publications explicitly mentioning GEOSCOPE since 1982 (list available on the GEOSCOPE website). They are also exploited within the observatory to provide information such as the rapid estimation of earthquake source parameters (catalogue available on the GEOSCOPE website). The GEOSCOPE team is made up of 11 people, 7 at the IPGP and 4 at the EOST (4 faculty members who are also researchers, 6 engineers and one administrative employee).

Activités en 2021
Activities in 2021

Anticipation du vieillissement des capteurs large-bande STS-1
Anticipated ageing of the STS1 broadband sensors

GEOSCOPE est un des seuls réseaux au monde à fournir des données très large bande, allant des hautes fréquences jusqu'à des périodes de 360 secondes et au-delà. La fabrication des capteurs STS-1 historiquement installés depuis la création de GEOSCOPE s'est arrêtée dans les années 90. En 2021, GEOSCOPE a fait l'acquisition de deux sismomètres de nouvelle génération (Trillium T360). Contrairement aux STS-1, ceux-ci intègrent leurs trois composantes dans une même enceinte qui n'a plus besoin d'être mise sous vide, simplifiant ainsi leur installation et leur maintenance. Les T360 devraient progressivement remplacer les STS-1 vieillissants sans nuire à la qualité des données. De par leur simplicité et leur fiabilité, les interruptions de service diminueront et conduiront à une nette amélioration des performances du réseau sismologique sur le long terme. GEOSCOPE, seul observatoire français à opérer ce type de capteurs, a fait le même choix que le réseau GSN américain.

GEOSCOPE is one of the only networks in the world to provide very-broadband data, ranging from high frequencies to periods of 360 seconds and more. Production of the STS1 sensors set up when GEOSCOPE was first created ceased in the 1990s. In 2021, GEOSCOPE bought two new-generation seismometers (Trillium T360). Unlike the STS1 sensors, their three components are integrated in a single unit that no longer needs to be kept under vacuum, thus simplifying installation and maintenance. These T360s should gradually replace the ageing STS1s without compromising data quality. Due to their simplicity and reliability, service interruptions will be reduced and there will be a significant improvement in the performance of the seismic station network over the long term. GEOSCOPE, the only French observatory to operate this type of sensor, has made the same choice as the US Global Seismographic Network.



Comparaison entre le capteur historique STS-1 (en haut) et le nouveau capteur T360 (en bas) sur les 3 composantes (Est à gauche, Nord au centre et vertical à droite) à la station SSB (Loire). Les performances sont très similaires et les courbes de bruit s'approchent de très près de la courbe noire du bas (« Low noise model »), témoignant du très bon fonctionnement des deux capteurs.

Three-component comparison at the SSB station in the Loire between the old STS1 sensor (top) and the new T360 sensor (bottom). East is left, North in the centre and vertical on the right. Performance is very similar and the noise curves are very close to the bottom black curve (low-noise model), showing that both sensors work very well.

Les nombreux essais effectués sur le site de la station SSB (département de la Loire) pour comparer les signaux entre les anciens et les nouveaux capteurs ont révélé des performances extrêmement similaires. Suite

Numerous tests carried out at the SSB station site (Loire *département)* to compare the signals from the old and new sensors revealed highly comparable performance. Following these successful tests, a

à ces tests concluants, un T360 a été installé par les partenaires de GEOSCOPE à la station TAM (Algérie), lequel a commencé à fonctionner en décembre 2021. Cette installation s'avérait d'autant plus nécessaire qu'à ce site historique du réseau, d'excellente qualité en termes de niveau de bruit, les composantes horizontales du STS-1 commençaient à se dégrader.

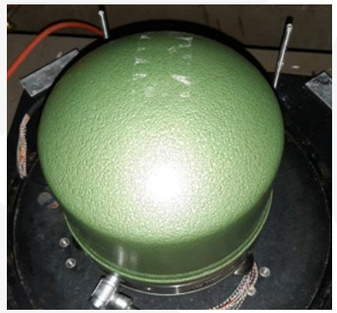
T360 was installed by GEOSCOPE partners at the TAM station (Algeria). It started operating in December 2021. This installation was really necessary as the horizontal components of the STS1 were beginning to deteriorate at this historical site, which is of excellent quality in terms of noise level.

Travaux pour améliorer et entretenir le réseau existant
Work to improve and maintain the current network

Du fait de la situation sanitaire, la grande majorité des travaux de maintenance s'est faite à distance, en interaction avec les partenaires locaux de GEOSCOPE. Bien qu'aucune opération d'envergure n'ait pu être réalisée, cette coopération a été efficace, comme le montre le fonctionnement quasi-intégral du réseau aujourd'hui. Un de ces nombreux exemples est la station SANVU (Vanuatu), où une remise en état de la connectique et de l'isolation du capteur a été réalisée.

Due to the health crisis, the vast majority of maintenance work was carried out remotely, through GEOSCOPE's local partners. Although no large-scale operations could be carried out, this cooperation was effective, reflected in the fact that the network is currently almost fully operational. One of the many examples is the SANVU station (Vanuatu), where the sensor connections and insulation were overhauled.

Vue du site qui héberge la station sismique SANVU (Vanuatu).
View of the site hosting the SANVU seismic station (Vanuatu).



Capteur STS-2 remis en état par les partenaires de GEOSCOPE à la station SANVU (Vanuatu).
STS2 sensor refurbished by GEOSCOPE partners at the SANVU station (Vanuatu).

Suivi et pérennisation de la diffusion des produits dérivés
Monitoring and perpetuation of the dissemination of GEOSCOPE-derived products

Mis en place par l'observatoire, en particulier concernant les informations sur les séismes récents. En collaboration avec le centre de données de l'IPGP, celles-ci sont accessibles sur le site Web de GEOSCOPE et diffusées via le fil twitter @geoscope_ipgp qui compte près de 3300 abonnés, soit 700 de plus que l'année passée.

In particular those providing information on recent earthquakes. In collaboration with the IPGP data centre, these are available on the GEOSCOPE website and disseminated via the @geoscope_ipgp Twitter feed, which has almost 3,300 subscribers, 700 more than last year.

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

Observatoire OBSERA
OBSERA observatory

L'observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles (OBSERA) étudie l'évolution des variables environnementales (pluviométrie, débit des rivières, conductivité, charge sédimentaire, composition chimique des sols, précipitations, etc.) dans quatre bassins versants de l'île de Basse-Terre, une île volcanique de l'archipel de Guadeloupe (arc des Petites Antilles). OBSERA mesure également l'évolution de la granulométrie et la morphologie de plusieurs rivières en utilisant des images aériennes acquises par un drone. Les objectifs d'OBSERA sont multiples : étudier l'érosion physique et chimique et son influence sur les grands cycles biogéochimiques dans le contexte particulier d'une île tropicale volcanique ; promouvoir le développement de nouveaux instruments et de nouvelles méthodes d'étude de l'environnement et des écosystèmes ; étudier de quelle manière les événements extrêmes (crues éclaires, tempêtes tropicales, tremblements de terre, etc.) influencent les cycles géochimiques (comme le cycle du carbone), les taux d'érosion et la morphologie des paysages.

L'observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles étudie l'évolution des variables environnementales dans quatre bassins versants de l'île de Basse-Terre, une île volcanique de l'archipel de Guadeloupe.

OBSERA est membre de la Très Grande Infrastructure de Recherche (TGIR) OZCAR (Observatoires de la Zone Critique Applications et Recherches). Les données de l'observatoire sont mises à la disposition de la communauté scientifique sur le site d'OBSERA.

The Observatory of Water and Erosion in the Antilles (OBSERA) monitors the evolution of environmental variables (e.g. rainfalls, river discharge, conductivity, sediment load, chemical composition of soils, rivers and precipitations, etc.) in four catchments located on Basse-Terre Island, a volcanic island of the Guadeloupe archipelago (Lesser Antilles arc). OBSERA also monitors the granulometry and the morphology of several river reaches using drone-acquired aerial images. The objectives of OBSERA are: to investigate chemical and physical erosion, their feedbacks and their influence on the carbon and water cycles and the environment in the peculiar context of a tropical volcanic island; to promote the development of new instruments and methods for studying the environment and ecosystems; to investigate how extreme events (floods induced by heavy rains and tropical storms, earthquakes, etc.) affect geochemical cycles (e.g. carbon cycle), erosion rates and landscape morphology.

The Observatory of Water and Erosion in the Antilles monitors the evolution of environmental variables in four catchments located on Basse-Terre Island, a volcanic island of the Guadeloupe archipelago.

OBSERA is involved in the creation of the Very Large Research Infrastructure (TGIR) OZCAR. The data from OBSERA are made freely available to the scientific community on the OBSERA website.

Activités en 2021
Activities in 2021

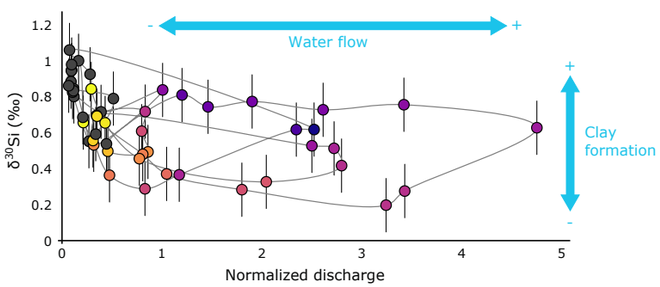
Projet SIFFT (Solute Isotope Fractionation during Fluid Transit)
SIFFT project (Solute Isotope Fractionation during Fluid Transit)

Le projet SIFFT, dirigé par J. Jotautas Baronas de l'équipe de géochimie des enveloppes externes de l'IPGP, utilise la composition chimique de la rivière Capesterre en Guadeloupe pour mieux comprendre le rôle que jouent les conditions hydrologiques dans le contrôle des réactions d'altération chimique. Celles-ci se produisent lorsque la pluie percole et s'écoule à travers les sols et la roche-mère, dissolvant certains minéraux et en précipitant d'autres. Ce processus crucial peut consommer ou libérer du CO_2 atmosphérique, agissant ainsi comme un thermostat global à l'échelle des temps géologiques. En particulier, le temps de transfert de l'eau depuis les sols vers les rivières est déterminant. L'idée clé de ce projet réside dans l'utilisation de traceurs géochimiques et isotopiques pour identifier de quelle manière l'étendue des réactions d'altération varie en fonction des conditions hydrologiques du bassin versant. Très érosif et homogène, recevant cinq mètres de précipitations par an, le petit bassin versant andésitique (16 km^2) de Capesterre s'avère ainsi être un laboratoire idéal pour étudier cette question.

Des échantillons mensuels et à haute résolution (événements pluvieux) sont collectés depuis le début de l'année 2021 à l'une des stations OBSERA installée sur la rivière Capesterre. Ces échantillons sont ensuite analysés pour mesurer leurs concentrations en solutés, leurs rapports germanium/silicium (Ge/Si) et leurs compositions isotopiques en silicium à l'IPGP (collaboration avec J. Bouchez, équipe G2E) et à l'Université Cornell (collaboration avec L. Derry). Ces traceurs, sensibles à la formation de minéraux argileux au cours de l'altération, peuvent révéler dans quelle mesure les réactions d'altération sont susceptibles de progresser dans le bassin versant avant que l'eau n'arrive à la rivière.

The SIFFT project led by J. Jotautas Baronas of the team "Geochemistry of Outer Layers" (G2E) at the IPGP, is using the chemical composition of the Capesterre River in Guadeloupe in order to better understand the role that hydrological conditions play in controlling chemical weathering reactions. Chemical weathering takes place when rain percolates through soils and bedrock, dissolving certain minerals and precipitating others. It is a crucial process that can consume or release atmospheric CO_2 and is thought to act as a global thermostat over million-year timescales. The time that water spends between entry in soils and delivery to rivers is thought to play an important role in weathering. The key idea of this project is that geochemical and isotopic tracers can reveal how the extent of weathering reactions varies with catchment hydrological conditions. Capesterre is ideal for this because it is a small (16 km^2), highly erosive, homogeneous andesitic watershed that receives five meters of rainfall per year. To achieve the aims of the project, monthly and high-resolution storm event samples are being collected since the beginning of the year 2021 at one of the OBSERA stations on the Capesterre River.

These samples are then analyzed for their solute concentrations, germanium-to-silicon ratios (Ge/Si), and silicon isotope compositions at the IPGP (collaboration with J. Bouchez, G2E team) and Cornell University (collaboration with L. Derry). These tracers are sensitive to the formation of clay minerals during weathering and can therefore reveal how far weathering reactions are able to progress in the catchment before water is delivered to the river.



Le rapport isotopique du silicium montre des variations importantes dans la rivière Capesterre au cours de différents évènements de crue en 2021 (les valeurs élevées de "δ^{30}Si" correspondent à un enrichissement en isotopes lourds du silicium, qui peuvent par exemple refléter la formation de minéraux dans les aquifères, ce processus menant à l'incorporation des isotopes les plus légers du silicium).

Dissolved silicon isotope ratios show large variations in the Capesterre River during several storm events in 2021 (higher values of "δ^{30}Si" correspond to enrichment in the heaviest isotopes of silicon, reflecting for example the formation of minerals in the subsurface that tend to incorporate the lightest isotopes of silicon).

Station OBSERA installée sur la rivière Capesterre.
The Capesterre River gauging station.

Dans le même temps, des enregistrements à long terme de traceurs « conservatifs » (concentration de chlorure, isotopes de la molécule d'eau) sont utilisés pour déterminer le temps de résidence de l'eau dans les réservoirs souterrains avant son exportation vers les rivières. Les données de terrain sont complétées par des expériences d'altération en laboratoire, où le matériau de chargement du bassin versant de Capesterre réagit pendant plusieurs mois dans des conditions de CO_2 élevées, semblables à celles du sol, permettant de mesurer directement les vitesses de la réaction d'altération et l'évolution des signatures réactives avec la formation progressive de nouveaux minéraux argileux. Enfin, les données de terrain et expérimentales sont utilisées pour calibrer un modèle de transport réactif en régime transitoire, afin d'évaluer quantitativement comment les variations des temps de transit de l'eau et des voies d'écoulement dominantes affectent l'étendue des réactions de dissolution et de précipitation des silicates à Capesterre.

Les résultats de ce projet, qui s'appuient sur les données hydrologiques et hydrochimiques à long terme collectées par l'équipe d'OBSERA, aideront à comprendre comment les réactions d'altération des silicates répondent aux changements des précipitations aux échelles horaire et mensuelle et conduiront à mieux appréhender le fonctionnement de l'altération en tant que thermostat terrestre. L'altération des roches volcaniques dans les tropiques représente une part importante du flux global d'altération, en raison de la réactivité élevée et du climat favorable, conférant une pertinence d'échelle planétaire à cette étude.

At the same time, long-term records of "conservative" tracers (chloride concentration, isotopes of the water molecule) are used to determine the time that water spends in the underground. The field data are being complemented with weathering experiments in the lab, where bedload material from the Capesterre catchment is being reacted for several months under elevated, soil-like CO_2 conditions, which will enable a direct measurement of weathering reaction rates and the evolution of the reactive proxy signatures with progressive clay formation. Finally, the field and experimental data will be used to calibrate a coupled transient hydrological - reactive transport model, in order to quantitatively assess how variations in water transit times and dominant flow paths affect the extent of silicate dissolution and precipitation reactions in Capesterre.

The results of this project, which leverages the long-term hydrological and hydrochemical data collected by the OBSERA team, will help understand how silicate weathering reactions respond to changes in rainfall both on hourly and monthly timescales, yielding insights into the functioning of weathering as a global thermostat. As weathering of volcanic rocks in the tropics accounts for an outsized portion of the global weathering flux, due to the high reactivity and favorable climate, lending global relevance to this study.

En savoir plus / Read more:

> webobsera.ipgp.fr

sommaire/contents

Observatoires volcanologiques et sismologiques
Volcanological and seismological observatories

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

- l'OVSG-IPGP est en charge de La Soufrière de Guadeloupe
- l'OVSM-IPGP est en charge de la montagne Pelée à la Martinique
- l'OVPF-IPGP est en charge du Piton de la Fournaise à La Réunion
- le REVOSIMA est en charge du volcan sous-marin au large de Mayotte (avec le BRGM, l'IFREMER et le CNRS)

Leurs missions, menées dans le cadre du service national d'observation en volcanologie (SNOV), en partenariat avec l'observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand (OPGC) et le laboratoire magmas et volcans (LMV) de l'université Clermont Auvergne, sont multiples :

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

The IPGP is in charge of monitoring the four active French volcanoes located overseas, as well as their regional seismicity and potential tsunami hazards. It does this through its volcanological and seismological observatories (OVS):

- the OVSG-IPGP is in charge of La Soufrière, Guadeloupe
- the OVSM-IPGP is in charge of Mount Pelee, Martinique
- the OVPF-IPGP is in charge of Piton de la Fournaise, Reunion Island
- REVOSIMA is in charge of the underwater volcano off Mayotte (along with the BRGM, the IFREMER and the CNRS)

Their multiple assignments, carried out through the French volcanology observation unit (SNOV) in partnership with the Clermont-Ferrand Earth Physics Observatory (OPGC) and the Magma and Volcano Laboratory (LMV) of Clermont Auvergne University, are to:

- observe and study volcanic phenomena in their seismo-tectonic context through permanent real-time monitoring and Earth science research programmes designed to increase understanding and improve modelling of volcanic processes in active volcanoes;
- develop sustainable multi-parameter databases available to the scientific community;
- detect any changes in the dynamics of volcanic systems and regional seismicity in order to inform and possibly alert the authorities in charge of civil protection and risk mitigation;
- disseminate the scientific knowledge acquired as widely as possible to civil society.

Observatoires Observatories

L'IPGP est en charge de la surveillance des quatre volcans actifs français situés outre-mer, ainsi que de leur sismicité régionale et des risques potentiels associés de formation de tsunami.

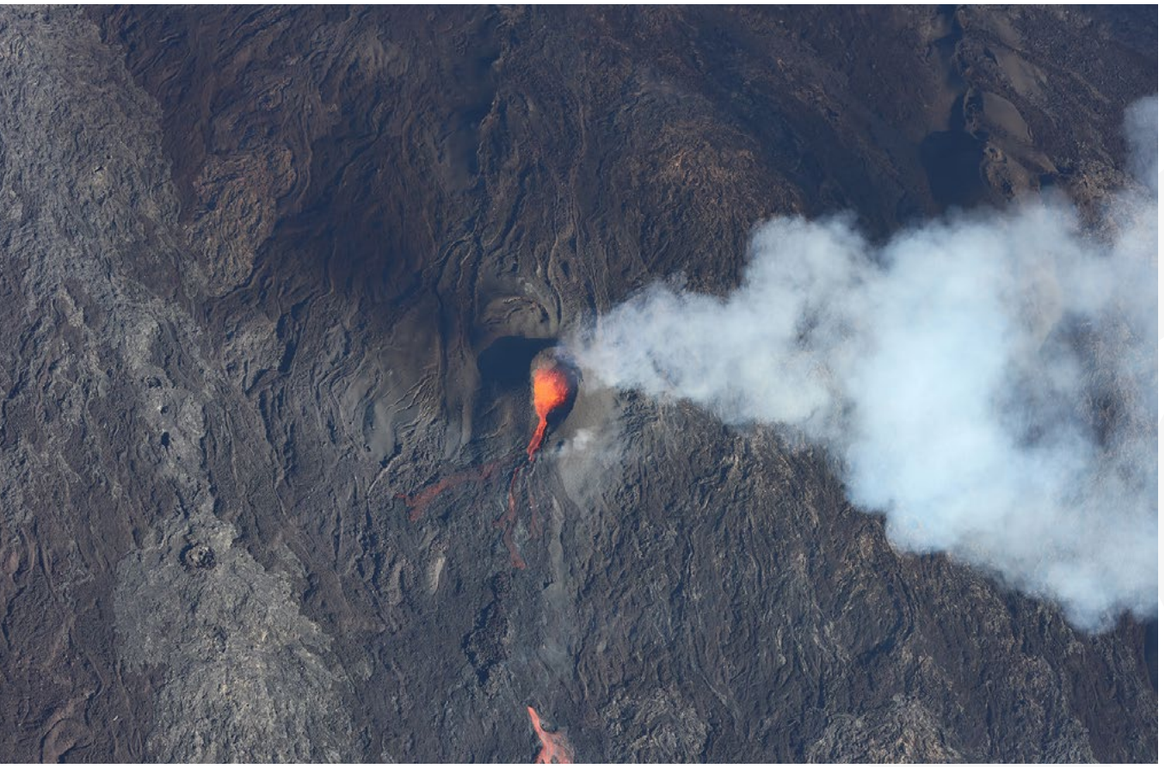
L'année 2021 a été marquée par le recrutement de Pierre Sakic, ingénieur de recherche spécialisé en géodésie terrestre et marine qui apporte ses compétences au REVOSIMA et aux OVS. Arnaud Lemarchand, après 15 ans de présence à la tête de la direction opérationnelle des observatoires, a rejoint la direction de l'IPGP en charge de l'instrumentation et passé le relais à Jean-Marie Saurel. Il reste impliqué dans les nombreux projets instrumentaux des observatoires, tels que les forages instrumentés à la Guadeloupe ou le réseau câblé sous-marin permanent MARMOR à Mayotte.

The IPGP is in charge of monitoring the four active French volcanoes located overseas, as well as their regional seismicity and potential tsunami hazards.

2021 was marked by the recruitment of Pierre Sakic, a research engineer specialising in terrestrial and marine geodesy, who brings his skills to REVOSIMA and the OVS. After 15 years heading up the operational management of observatories, Arnaud Lemarchand handed this task over to Jean-Marie Saurel in order to direct the IPGP instrumentation team. He remains involved in the many instrument-related projects of the observatories, such as the instrumented boreholes in Guadeloupe or the MARMOR permanent underwater cable network in Mayotte.

Activité sismique et volcanique en 2021
Seismic and volcanic activity in 2021

Le Piton de la Fournaise à La Réunion
The Piton de la Fournaise volcano, Reunion Island



Une nouvelle fois, l'année fut particulièrement active avec deux éruptions à l'intérieur de la caldera de l'Enclos Fouqué, ainsi qu'une intrusion vers le flanc est qui n'a pas débouché sur une activité de surface. Au total, cette activité a représenté 54 jours d'éruption sur l'ensemble de l'année. Du côté de l'OVPF-IPGP, cela s'est traduit par 942 heures d'astreintes renforcées (se rajoutant aux astreintes H24 classiques) et 14 alertes en lien avec l'activité du volcan auprès de l'astreinte de l'état-major de zone et de protection civile de l'Océan Indien - EMZPCOI (augmentation de la sismicité, crises sismiques, début du trémor éruptif, fin du trémor éruptif...), qui ont conduit à neuf changements de niveau d'alerte prévu dans le cadre du dispositif ORSEC « volcan du Piton de la Fournaise », par le préfet de La Réunion.

Once again, the year was particularly busy with two eruptions inside the Enclos Fouqué caldera, as well as an intrusion towards the eastern flank that did not lead to surface activity. In all, this activity represented 54 eruption days over the year. For the OVPF-IPGP, this resulted in 942 hours of reinforced on-call duty (in addition to the standard 24-hour on-call duty) and 14 alerts related to the volcano's activity to on-call staff of the Indian Ocean civil protection zone, EMZPCOI (increase in seismicity, seismic crises, start of eruptive tremor, end of eruptive tremor, etc.), which led to nine changes in the alert level provided for in the ORSEC "Piton de la Fournaise volcano" plan by the Prefect of Reunion Island.

sommaire/contents

Mayotte
Mayotte

L'activité sismique s'est révélée plus faible que les deux années précédentes. Le nombre de séismes a progressivement diminué au cours de l'année, avec une moyenne de dix évènements par jour fin 2021. Cinq séismes ont été ressentis par la population de Mayotte. L'OVPF-IPGP, en association avec le BRGM de Mayotte, applique à chacun d'eux un protocole permettant d'informer les autorités et la population à travers la diffusion d'un bulletin exceptionnel. En parallèle, les déformations enregistrées par le réseau GPS installé sur l'île sont devenues trop faibles depuis fin 2020 pour témoigner d'une cohérence dans les signaux. Par ailleurs, les flux de CO_2 enregistrés dans le sol à Petite-Terre sont restés stables avec des valeurs faibles.

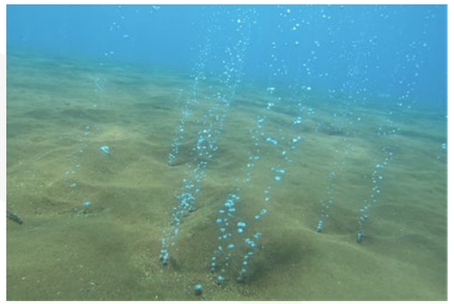
Concernant les émissions de lave sur le site éruptif, les campagnes en mer de surveillance MAYOBS 18 (du 9 au 13 avril 2021) et MAYOBS 19 (du 27 mai au 1er juin 2021) ont montré qu'aucune évolution morphologique majeure n'avait été mise en évidence dans la zone des coulées au nord-ouest du nouveau volcan.

Seismic activity was lower than in the previous two years. The number of earthquakes gradually decreased over the year, ending in an average of ten events per day by late 2021. Five earthquakes were felt by the population of Mayotte. The OVPF-IPGP, in conjunction with the BRGM of Mayotte, applies a protocol to each of these events to inform the authorities and the population through the dissemination of an emergency bulletin. At the same time, the deformations recorded by the GPS network on the island have become too small since the end of 2020 to show any consistency in the signals. Furthermore, the CO_2 fluxes recorded in the ground at Petite-Terre remained steadily low.

Regarding lava emissions at the eruption site, the MAYOBS 18 (9-13 April 2021) and MAYOBS 19 (27 May-1 June 2021) offshore monitoring campaigns revealed no major morphological changes in the flow area northwest of the new volcano.

La Montagne Pelée à la Martinique
Mount Pelee, Martinique

La sismicité volcanique est restée au-dessus du niveau de base avec 2539 séismes de type volcano-tectonique et un pic d'activité en avril. Des signaux sismiques liés à la présence et à la migration de fluides du système hydrothermal de la montagne Pelée ont été enregistrés. Cependant, l'énergie sismique libérée reste faible et aucune déformation significative des flancs du volcan pouvant être associée à un déplacement de magma en profondeur n'a été détectée.



Zone de dégazage en mer à faible profondeur entre Saint-Pierre et le Prêcheur.

Shallow sea degassing zone between Saint-Pierre and Le Prêcheur.

Depuis le mois de juillet, une zone de dégazage en mer à faible profondeur entre Saint-Pierre et le Prêcheur est suivie afin de déterminer sa relation éventuelle avec l'activité de la montagne Pelée. Par ailleurs 880 séismes d'origine tectonique ont été enregistrés, dont 5 ont été ressentis par la population et ont fait l'objet de communiqués spécifiques.

Volcanic seismicity remained above the baseline, with 2,539 volcano-tectonic earthquakes and a peak in activity in April. Seismic signals related to the presence and migration of fluids from Mount Pelee's hydrothermal system were recorded. However, the seismic energy released remained low and no significant deformation in the volcano's flanks potentially due to deep magma displacement was detected.

Since July, outgassing in a shallow area of sea between Saint-Pierre and Prêcheur has been monitored to determine its possible relationship with the activity of Mount Pelee. In addition, 880 earthquakes of tectonic origin were recorded, five of which were felt by the population and were the subject of specific releases.

sommaire/contents

La Soufrière de Guadeloupe
La Soufrière, Guadeloupe

La sismicité volcanique est restée au-dessus du niveau de base en 2021 avec 7802 séismes de type volcano-tectonique et un pic d'activité entre fin septembre et début novembre. Les signaux sismiques sont liés à la migration de fluides du système hydrothermal de la Soufrière. Cependant, l'énergie sismique libérée est encore faible et aucune déformation significative profonde pouvant être associée à un déplacement de magma en profondeur n'a pour l'instant été détectée.

Depuis le mois de juin, une évolution de la zone fumerolienne du cratère sud a été observée avec le colmatage de la bouche principale, surveillée par un monitoring géochimique, et une migration de l'activité vers une autre bouche située plus au nord du cratère. Cette évolution semble correspondre avec une activité sismique plus superficielle. Une reprise du dégazage de type fumerolien a été observée en fin d'année le long de la faille de la Ty, vers la base morphologique du dôme. Au niveau régional, 1016 séismes d'origine tectonique ont été enregistrés en 2021, dont 11 ont été ressentis par la population et ont fait l'objet de communiqués spécifiques.

Volcanic seismicity remained above the baseline in 2021, with 7,802 volcano-tectonic earthquakes and a peak in activity between late September and early November. The seismic signals were related to fluid migration through the volcano's hydrothermal system. However, the seismic energy released remained low and no significant deformation potentially due to deep magma displacement has been detected so far.

Since June, changes have been observed in the fumarole zone of the southern crater, with the clogging of the main vent observed by geochemical monitoring, and a migration of activity towards another vent further north of the crater. These changes appear to be consistent with a more superficial seismic activity. A resumption of fumarole-like outgassing was observed at the end of the year along the Ty fault, towards the morphological base of the dome. On a regional scale, 1,016 tectonic earthquakes were recorded in 2021. Of these, 11 were felt by the population and were the subject of specific releases.

Activité dans les réseaux d'observation en 2021
Activity in the observation networks in 2021

Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF-IPGP)
The Piton de la Fournaise Volcanological Observatory (OVPF-IPGP)

Dans le cadre de sa visite officielle sur l'île de La Réunion, Frédérique Vidal, ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, s'est rendue le 20 novembre à l'OVPF-IPGP. L'occasion pour l'équipe de l'observatoire de présenter ses missions, les enjeux de la surveillance volcanologique pour le territoire réunionnais mais aussi mahorais avec les actions du REVOSIMA, ainsi que les travaux de recherche en volcanologie menées au sein de l'OVPF et de l'université de La Réunion et leur bénéfice pour la population et le territoire. À l'issue de sa visite, Frédérique Vidal a annoncé que l'État s'associerait aux collectivités pour accompagner la reconstruction de l'observatoire, devenu trop exigu et vieillissant pour mener à bien ses missions.

As part of her official visit to Reunion Island, Frédérique Vidal — French Minister for Higher Education, Research and Innovation — visited the OVPF-IPGP on 20 November. This was an opportunity for the observatory's team to present its assignments, the challenges of volcanological monitoring for both Reunion and Mayotte with the actions of REVOSIMA, and volcanology research carried out within the OVPF and the University of Reunion Island and its benefits for the population and region. At the end of her visit, Frédérique Vidal announced that the State would join forces with local authorities to support the rebuilding of the observatory, which has become too small and outdated to carry out its remit.

sommaire/contents

Installation d'un capteur GNSS permanent au sommet de la montagne Pelée.
Installation of a permanent GNSS sensor at the top of Mount Pelée.

Observatoire volcanologique et sismologique de la Martinique (OVSM-IPGP)
Volcanological and Seismological Observatory of Martinique (OVSM-IPGP)

Le renforcement et la modernisation des réseaux de surveillance de la montagne Pelée se sont poursuivis : deux nouveaux capteurs GNSS permanents ont été installés et trois réseaux denses de capteurs sismologiques ont enregistré la sismicité durant trois semaines. L'analyse de leurs données permettra de comprendre la relation entre la sismicité volcanique et le système hydrothermal de l'édifice. Par ailleurs, un sondeur bathymétrique multi-faisceaux a été acquis dans le cadre du projet Interreg Caraïbes PREST (Plateforme Régionale de Surveillance Tellurique) permettant d'imager finement le fond marin jusqu'à 300 m de profondeur (voir focus nouveaux instruments p. 10).

The consolidation and modernisation of the Mount Pelee monitoring networks continued in 2021: two new permanent GNSS sensors were set up and three dense networks of seismological sensors recorded seismicity for three weeks. The analysis of their data will shed light on the relationship between the volcano's seismicity and its hydrothermal system. In addition, a multi-beam bathymetric sounder was acquired as part of the Interreg Caribbean PREST project (a regional platform for telluric monitoring). The sounder offers detailed imagery of the seafloor to a depth of 300 m (see the focus on new instruments, p. 10).

sommaire/contents

Installation de la station multi-paramètres de Morne Lenglet à la Guadeloupe.

Installation of the multi-parameter station in Morne Lenglet, Guadeloupe.

Observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe (OVSG-IPGP)
Volcanological and Seismological Observatory of Guadeloupe (OVSG-IPGP)

Un sismomètre optique a été installé en fond de mer à Terre de Bas en juin. Cet appareil, développé récemment par l'ESEO, permet de mieux localiser les petits séismes fréquemment ressentis par la population locale et devrait mener à une meilleure compréhension de la genèse de ces séismes. Ce projet, porté par Pascal Bernard de l'équipe de sismologie de l'IPGP, est financé par l'Interreg Caraïbes PREST (Plateforme Régionale de Surveillance Tellurique). Plus d'infos sur ce projet p. 144-145.

L'extension des réseaux a continué aussi à terre avec l'installation d'une station multi-paramètres dotée d'un GNSS, d'un sismomètre et prochainement d'un géophone. Cette station autonome en énergie et télémétrée est dédiée au suivi de l'activité volcanologique. Elle a été financée dans le cadre d'une convention entre l'IPGP et le ministère de la Transition écologique.

An optical seismometer was deployed on the seafloor in Terre de Bas in June. Developed recently by the ESEO, this device offers more accurate location of the small earthquakes frequently felt by the local population, and should clarify the origin of these earthquakes. This project, led by Pascal Bernard of the IPGP seismology team, is funded by the Interreg Caribbean PREST project. For more information on this project, please see p. 144-145.

The networks continued to be extended on land too, with the addition of a multi-parameter station featuring a GNSS, a seismometer and, in the near future, a geophone. This self-powered and remotely operated station is dedicated to monitoring volcanic activity. It was funded under an agreement between the IPGP and the French Ministry of Ecological Transition.

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

Centre de données IPGP
IPGP Data Centre

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

Le CD-IPGP gère les données (sismologiques, GNSS, volcanologiques) de 7 réseaux d'observation : GEOSCOPE (G), l'observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe (GL), l'observatoire volcanologique et sismologique de Martinique (MQ), l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (PF), le réseau sismique et volcanique de l'archipel des Comores (QM), le réseau sismologique français des Antilles (WI) et l'observatoire martien InSight (XB 2016-2022).

Le centre de données assure la gestion et la mise à disposition des données d'observation de l'IPGP pour la communauté scientifique.

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

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

The data centre manages the IPGP's observation data and makes them available to the scientific community. It is tasked with their archiving, long-term storage (enhanced protection) and distribution via standard formats and interfaces. It is also responsible for interconnection with national (RESIF-EPOS and ForM@Ter), European (EPOS) and global (FDSN and NASA's Planetary Data System) services. In addition, it is responsible for declaring the digital object identifiers (DOIs) associated with IPGP data networks.

The IPGP data centre manages seismological, GNSS and volcanological data from seven observation networks: GEOSCOPE (G), the Volcanological and Seismological Observatory of Guadeloupe (GL), the Volcanological and Seismological Observatory of Martinique (MQ), the Volcanological Observatory of Piton de la Fournaise (PF), the Comoros Archipelago Seismic and Volcanic Network (QM), the French West Indies Seismological Network (WI) and the InSight Mars Observatory (XB 2016-2022).

The data centre manages the IPGP's observation data and makes them available to the scientific community.

In 2020, management tasked the IPGP data centre with creating a data warehouse for the preservation, dissemination and exploitation of data from the IPGP's research and observation activities, by facilitating their identification and citation.

The IPGP data centre team is made up of four people (one researcher and three engineers), with administrative support provided by two managers. It works closely with the IPGP observatories, the S-CAPAD platform and the IPGP IT department. The team members are also part of the RESIF and ForM@Ter network of engineers.

Chiffres clés du centre de données IPGP
Key figures of the IPGP data centre

≈ 5 gigaoctets de données disponibles en temps réel par jour.

≈ **5** gigabytes of data available in real time per day.

179 stations sismologiques* dont 140 actuellement opérationnelles.

179 seismic stations*, of which 140 are currently operational.

71 stations GNSS*.

71 GNSS stations*.

15 téraoctets de données sismologiques, GNSS, volcanologiques et produits dérivés archivés.

15 terabytes of archived seismological, GNSS and volcanological data and derived products.

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

40 years of observation data available and accessible via standard interfaces.

Plus de **11** téraoctets de données ont été consultés directement depuis le CD-IPGP en 2021.

Over **11** terabytes of data were accessed directly from the IPGP data centre, in 2021.

* Le CD-IPGP gère les données de 7 réseaux d'observation (voir page précédente)
* The IPGP data centre manages data from 7 observation networks (see previous page)

Réalisations marquantes en 2021
Achievements in 2021

Le CD-IPGP est maintenant référencé dans le registre des dépôts de données de recherche *re3data.org* avec un identifiant numérique unique (DOI : 10.17616/R31NJN23) qui permet de le citer dans des publications scientifiques.

The IPGP data centre is now listed in the *re3data.org* registry of research data repositories with a unique digital identifier (DOI: 10.17616/R31NJN23), which allows it to be cited in scientific publications.

Un identifiant unique numérique (DOI : 10.18715/Mayotte.REVOSIMA) a été créé pour le réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA), avec la conception et implémentation de la page d'accueil du DOI, présentée sur le portail Volobsis. Le REVOSIMA est maintenant intégré dans les missions du CD-IPGP.

A unique digital identifier (DOI: 10.18715/Mayotte.REVOSIMA) was created for the Mayotte Volcanological and Seismological Monitoring Network (REVOSIMA), with the design and implementation of the DOI homepage, presented on the Volobsis portal. The REVOSIMA is now included in the missions of the IPGP data centre.

Les données des trois stations sismologiques du réseau sismologique et volcanologique permanent de l'archipel des Comores sont maintenant disponibles en temps réel via les interfaces standards du CD-IPGP. Un DOI (10.18715/Mayotte.QM) a également été créé avec une page d'accueil présentée sur le portail Volobsis.

Data from the three seismic stations of the permanent Comoros Archipelago Seismic and Volcanic Network are now available in real time via the standard IPGP data centre interfaces.
A DOI (10.18715/Mayotte.QM) has also been created with a homepage presented on the Volobsis portal.

Dans le cadre de sa nouvelle mission de mise en place d'un service d'entrepôt des données de la recherche et d'observation, le CD-IPGP a poursuivi en 2021 l'implémentation de l'entrepôt, basé sur la technologie « Dataverse ». La version finale sera mise en ligne au cours du second trimestre 2022.

As part of its new task to set up a warehouse service for research and observation data, the IPGP data centre continued its implementation in 2021, based on Dataverse technology. The final version will be released in the second quarter of 2022.

Participation au système d'information sismologique de Résif (Résif-SI) : en 2021, Constanza Pardo est devenue responsable nationale du comité technique de Résif-SI. Elle siège également au comité de pilotage, dirigé par Claudio Satriano.

Participation in the RESIF seismological information system (RESIF-SI): in 2021, Constanza Pardo became the national manager of the RESIF-SI technical committee. She also sits on the steering committee, headed by Claudio Satriano.

Participation au projet Equipex+ GAIA Data, financé par le PIA 3. L'objectif est de développer un dispositif global d'accès à des données, produits et services FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) pour le système Terre. Ce projet est coordonné à l'IPGP par Claudio Satriano et implique les équipes du CD-IPGP, S-CAPAD, ForM@Ter et le service informatique de l'IPGP.

Participation in the Equipex+ GAIA Data project, funded by the third future investments programme (PIA 3). The goal is to develop a global system for access to FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) data, products and services for the Earth system. This project is being coordinated at the IPGP by Claudio Satriano and involves the IPGP data centre, S-CAPAD, ForM@Ter and the IPGP IT department.

Participation au sous-comité « Données de la recherche », dans le cadre du comité « Science ouverte » d'Université Paris Cité. Participation à la rédaction d'un projet pour l'appel à manifestation d'intérêt « Ateliers de la donnée » par Recherche Data Gouv.

Participation in the Research Data sub-committee, as part of the Open Science committee of Université Paris Cité. Participation in the drafting of a project for the "Data Workshops" call for expressions of interest issued by *Recherche Data Gouv*.

En savoir plus / Read more:	
> Portail Volobsis > Volobsis portal	volobsis.ipgp.fr
> Service d'entrepôt des données de la recherche et d'observation (mise en ligne mi-2022) > Warehouse service for research and observation data (to be launched mid-2022)	https://research-collection.ipgp.fr
> « Science ouverte » d'Université Paris Cité > Université Paris Cité's "Open Science" programme	https://u-paris.fr/science-ouverte

ForM@Ter – pôle national de données et de services pour la Terre solide au sein de l'infrastructure de recherche Data Terra
ForM@Ter – the national data and services centre for the Solid Earth, part of the French research infrastructure Data Terra

Le pôle national ForM@Ter vise à faciliter l'accès aux données spatiales, in-situ et d'expérimentation du domaine Terre solide et à contribuer à la création de produits et services à partir de celles-ci. S'inscrivant dans les paysages national et européen, il est une composante de l'infrastructure de recherche nationale Data Terra dédiée aux données sur l'ensemble du système Terre.

ForM@Ter comporte une structure opérationnelle, le centre de coordination et de diffusion (CCD), basée à l'IPGP au sein du département des observatoires. Le pôle fédère des centres de données et de services (CDS) ainsi que des centres d'expertise scientifique (CES) en France. Depuis octobre 2021, les locaux du CCD sont situés au 1 rue Jussieu à Paris.

The ForM@Ter national data cluster is designed to facilitate access to satellite, in-situ and experimental data in the solid Earth sciences and contribute to the creation of derived products and services. It is an important part of the French and European landscape and a component of Data Terra, the national research infrastructure devoted to data on the entire Earth system.

ForM@Ter's operational structure is its Coordination and Distribution Centre (CCD), based at the IPGP within the Observatories Department. The cluster brings together data and service centres (CDSs) and centres of scientific expertise (CESs) in France. Since October 2021, the CCD's premises have been near the IPGP at 1 rue Jussieu, Paris.

Réalisations marquantes en 2021
Main achievements in 2021

Structuration du pôle
Organization of the cluster

Suite à la signature de la convention constitutive en 2020, deux composantes de la gouvernance du pôle ont été constituées :

- Le comité scientifique, composé de 20 membres représentants les disciplines scientifiques dans le périmètre du pôle (géodésie, gravimétrie, sismologie, déformations du sol, géologie et géodynamique, magnétisme, volcanologie, géochimie et expérimentation, fond de mer) ;

Following the signature of the founding agreement in 2020, two components of the cluster's governance were set up:

- The Scientific Committee, whose 20 members represent scientific disciplines within the cluster's remit (geodesy, gravimetry, seismology, ground deformations, geology and geodynamics, magnetism, volcanology, geochemistry and experimentation, seafloor);

sommaire/contents

- Le comité directeur composé d'un représentant de chacune des 13 parties signataires (CNRS, CNES, IPGP, BRGM, SHOM, IGN, IRD, Obs. de Paris, Obs. Côte d'Azur, Université de Toulouse, Université de Grenoble, Université Clermont-Auvergne, Université de Strasbourg).

L'une des premières décisions du comité directeur a été d'élire le nouveau directeur de ForM@Ter, Emmanuel Chaljub, physicien CNAP à l'observatoire des sciences de l'univers de Grenoble, au sein de l'Institut des sciences de la Terre. Il succède à Michel Diament depuis le 1er septembre 2021.

Le pôle national ForM@Ter vise à faciliter l'accès aux données spatiales, in-situ et d'expérimentation du domaine Terre solide et à contribuer à la création de produits et services à partir de celles-ci.

- The Steering Committee, made up of one representative from each of the 13 signatory parties (CNRS, CNES, IPGP, BRGM, SHOM, IGN, IRD, Paris Observatory, Côte d'Azur Observatory, University of Toulouse, University of Grenoble, University of Clermont-Auvergne, University of Strasbourg).

One of the Steering Committee's first decisions was to elect the new director of ForM@Ter, Emmanuel Chaljub, CNAP senior physicist at the Universe Science Observatory in Grenoble, within the Institute of Earth Sciences (IST). He took over from Michel Diament on 1 September 2021.

The ForM@Ter national data cluster is designed to facilitate access to satellite, in-situ and experimental data in the solid Earth sciences and contribute to the creation of derived products and services.

Ouverture de services de calcul à la demande basés sur l'imagerie optique
Launch of on-demand computing services based on optical imagery

Quatre services de calcul ont été ouverts et sont opérationnels. Ils sont disponibles via le portail de ForM@Ter.

- **Ground Deformation Monitoring (GDM) Optic**
  Ce dispositif de calcul à la demande de déformation du sol à partir d'images satellitaires optiques comporte trois services dédiés respectivement à la tectonique, à la cryosphère et aux glissements de terrain, GDM-ETQ, GDM-ICE, GDM-SLIDE.
  GDM-ETQ est une contribution à l'infrastructure de recherche européenne en sciences de la Terre EPOS (European Plate Observing System).

- **Production de modèles numériques de surface (MNS)**
  Ce service, développé et opéré par ForM@Ter en collaboration avec le pôle Théia et le dispositif transversal DINAMIS de Data Terra, génère et évalue automatiquement la qualité intrinsèque de MNS à partir d'images optiques stéréoscopiques. Il est déployé sur l'infrastructure de calcul Unistra-EOST/A2S à partir des données Pléiades fournies par le CNES.

Four computing services have been launched and are operational. They are available via the ForM@Ter portal.

- **Ground Deformation Monitoring (GDM) Optic**
  This system for on-demand computing of ground deformation using optical satellite images comprises three services dedicated respectively to tectonics, the cryosphere and landslides: GDM-ETQ, GDM-ICE and GDM-SLIDE.
  GDM-ETQ contributes to the European Plate Observing System (EPOS) for Earth sciences research.

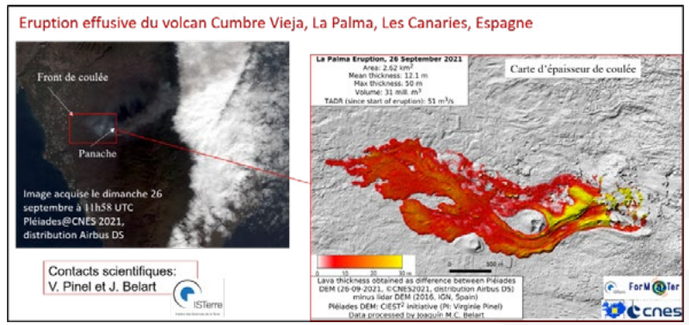
- **Production of digital surface models (DSMs)**
  This service, developed and operated by ForM@Ter in collaboration with the Théia platform and Data Terra's cross-cutting DINAMIS system, generates DSMs from stereoscopic optical images and automatically assesses their intrinsic quality. It has been deployed on the Unistra-EOST/A2S computing infrastructure using Pléiades data provided by the CNES, the French space agency.

sommaire/contents

Des services sur activation et appel à idées opérationnels
Activation-based services operational and call for ideas implemented

- **CIEST²**
  La Cellule d'Intervention d'Expertise Scientifique et Technique (CIEST), initiative relancée par ForM@Ter et le CNES, est un dispositif qui permet de programmer en urgence des données satellitaires optiques et de générer des cartes de déplacement ou des informations de changement de masse en cas d'aléa géophysique, tels que les séismes majeurs, les phases d'éruption volcanique ou les effondrements gravitaires. Depuis 2021, le dispositif a été déclenché huit fois et le processus a été rendu plus efficace par la connexion avec le service de calcul à la demande de MNS.

- **CIEST²**
  The Scientific & Technical Expertise Response Unit (CIEST), an initiative relaunched by ForM@Ter and the CNES, enables the emergency scheduling of optical satellite data and the generation of ground displacement maps or information on mass changes in the event of geophysical hazards such as major earthquakes, volcanic eruptions or gravity-related collapses. The system has been triggered eight times since 2021 and the process has been made more efficient by its connection to the on-demand DSM computing service.



Exemple de résultats obtenus suite à l'activation du dispositif CIEST² deux jours après l'éruption du volcan Cumbre Vieja débutée le 19 septembre 2021. Première acquisition d'image le 22 septembre. Production automatique de MNS via le service DSM-OPT (ForM@Ter), production avec ASP (protocole appliqué pour le suivi de l'éruption du volcan Fagradalsfjall, Islande).

Example of results obtained following activation of the CIEST² system two days after the eruption of the Cumbre Vieja volcano that began on 19 September 2021. First images acquired on 22 September. Automatic production of DSMs via the DSM-OPT service (ForM@Ter), production with ASP (protocol applied for monitoring eruption of the Fagradalsfjall volcano, Iceland).

- **FLATSIM**
  Le service FLATSIM (ForM@Ter LArge-scale multi-Temporal Sentinel-1 InterferoMetry processing chain) permet le calcul systématique de séries d'interferogrammes sur de grandes zones géographiques. Il est développé par le CNES dans le cadre de ForM@Ter en collaboration avec des équipes des laboratoires ISTerre, LGL-TPE et de l'IPGP. Déjà opérationnel en 2020, il continue de fournir des produits sur les zones identifiées suite à l'appel à idées de 2020. Cette année, des produits sur le Tibet, les Andes, les rifts de l'Afar et le bassin du Mississipi ont été rendus disponibles aux porteurs des projets via le métacatalogue du pôle.

- **FLATSIM**
  The ForM@Ter LArge-scale multi-Temporal Sentinel-1 InterferoMetry processing chain (FLATSIM) is a service offering the systematic calculation of series of interferograms over large geographical areas. It was developed by the CNES for ForM@Ter jointly with teams from the ISTerre, LGL-TPE and IPGP laboratories. Already operational in 2020, it will continue to provide products on the geographical areas identified following the 2020 call for ideas. In the past year, products on Tibet, the Andes, the Afar rift system and the Mississippi basin were made available to project leaders via the centre's meta-catalogue.

En savoir plus / Read more:
> www.poleterresolide.fr
> www.data-terra.org

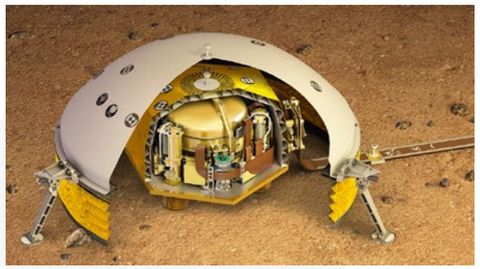
sommaire/contents

InSight
InSight

Ce service national d'observation (SNO) accompagne la mission NASA InSight, qui a déployé fin 2018 un observatoire géophysique à la surface de la planète Mars, réalisant des mesures sismiques, géodésiques et magnétiques simultanées.

Ce service est porté par l'IPGP, en collaboration avec plusieurs laboratoires et observatoires français (en particulier le LPG et GEOAZUR).

L'IPGP est responsable avec le CNES de SEIS, instrument principal de la mission, de la validation des données de cette expérience et du Mars SEIS data service (MSDS), chargé de leur diffusion et archivage. L'IPGP contribue aussi au Mars Structure Service et au Marsquake Service, chargés de l'analyse de ces données, de la détermination des modèles de structure interne de Mars et de sa sismicité.



L'année 2021 a consacré la fin de la première année martienne (équivalant à environ deux années terriennes) ainsi que celle des premiers modèles de la planète rouge. Plus de 75 articles ont ainsi été publiés en 2020-2021, dont deux tiers avec des co-auteurs appartenant à l'IPGP. Par ailleurs, suite au succès de la mission InSight, la NASA a sélectionné en juin 2021 le projet Farside Seismic Suite, qui permettra au SNO d'installer en 2025 sa seconde station sur la face cachée de la Lune. Dossier spécial Mars à suivre p. 114.

This National Observation Service (SNO) is assisting with NASA's InSight mission, which in late 2018 deployed a geophysical observatory on the surface of Mars to perform simultaneous seismic, geodetic and magnetic measurements.

This service is supported by the IPGP, together with several French laboratories and observatories (in particular the LPG and GEOAZUR).

The IPGP and the CNES are jointly responsible for SEIS (the mission's main instrument), for validating the experiment's data and those of the Mars SEIS data service (MSDS). The IPGP is also tasked with distributing and archiving these data. The IPGP also contributes to the Mars Structure Service and the Marsquake Service, which are responsible for analysing these data, and determining models of the planet's internal structure and seismicity.

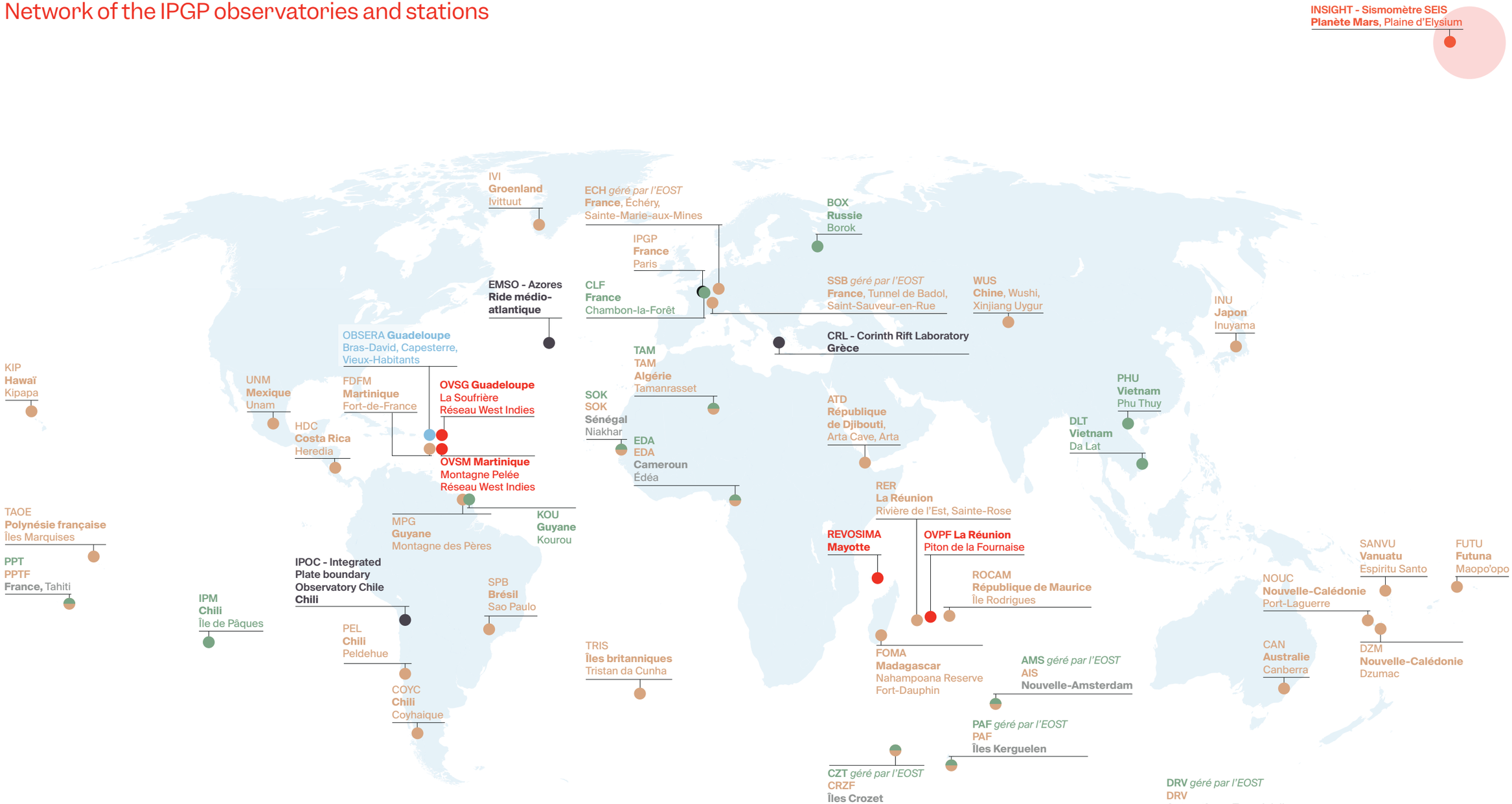
Last year marked the end of the first Martian year (equivalent to about two Earth years) and of the first models of the Red Planet. More than 75 articles were published in 2020-2021, two thirds of which were co-authored by IPGP staff. In addition, following the success of the InSight mission, in June 2021 NASA selected the Farside Seismic Suite project, which will enable the SNO to install its second station on the far side of the Moon in 2025. Mars special report to follow p. 114.

En savoir plus / Read more:
> https://www.seis-insight.eu/fr/

sommaire/contents

Observatoires Observatories

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



- **Observatoires volcanologiques et sismologiques** Volcanological and seismological observatories
- **Observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles OBSERA** Observatory of water and erosion in the Antilles OBSERA
- **Observatoires magnétiques du BCMT** BCMT Magnetic observatories
- **Stations sismologiques GEOSCOPE** GEOSCOPE seismological stations
- **Sites instrumentés** Instrumented sites
- **Service national d'observation InSight** InSight National Observation Service

Avec With: **L'école et observatoire des sciences de la Terre EOST**

sommaire/contents

Mission InSight : Mars se dévoile
InSight mission: Mars unveiled

À partir d'une dizaine de séismes détectés sur Mars par le sismomètre très large bande SEIS, développé en France, l'équipe internationale de la mission InSight de la NASA dévoile la structure interne de Mars.

Il s'agit de la première exploration par la sismologie de la structure interne d'une planète tellurique autre que la Terre et d'une étape importante pour comprendre la formation et l'évolution thermique de Mars.

Couverture du journal Science du 23 juillet 2021 illustrée par les données diffusées par le SNO InSight.

Cover of the July 23, 2021 issue of the Science Journal with data released by SNO InSight.

Les trois études publiées le 23 juillet 2021 dans la revue Science, impliquant de nombreux co-auteurs d'institutions et laboratoires français, dont l'IPGP, le CNRS, Université Paris Cité et soutenues notamment par le CNES et l'ANR, révèlent, pour la première fois et grâce à l'analyse des ondes sismiques, réfléchies et modifiées par ces interfaces internes, une estimation de la taille du noyau, de l'épaisseur de la croûte et de la structure du manteau. Il s'agit de la première exploration par la sismologie de la structure interne d'une planète tellurique autre que la Terre et d'une étape importante pour comprendre la formation et l'évolution thermique de Mars.

Avec le succès du déploiement de l'expérience SEIS à la surface de Mars début 2019, les scientifiques de la mission, dont les 18 co-auteurs français impliqués et affiliés à de nombreuses institutions et laboratoires français, et leurs collègues de l'ETH de Zurich, de l'Université de Cologne et du Jet Propulsion Laboratory de Pasadena, ont collecté et analysé les données sismiques d'une année martienne (soit presque deux ans terrestres).

Pour déterminer tout à la fois un modèle de structure, le temps (d'arrivée) du séisme et sa distance, il faut habituellement disposer de plus d'une station. Or, sur Mars une seule station est à disposition des scientifiques, InSight. Il a donc fallu rechercher, identifier et valider dans les enregistrements sismiques, la signature d'ondes ayant interagi différemment avec les structures internes de Mars. Ces nouvelles mesures, couplées avec des modélisations minéralogiques et thermiques de la structure interne, ont permis de s'affranchir de la contrainte de station unique.

sommaire/contents

#DOSSIER SPÉCIAL #SPECIAL REPORT **#MARS**

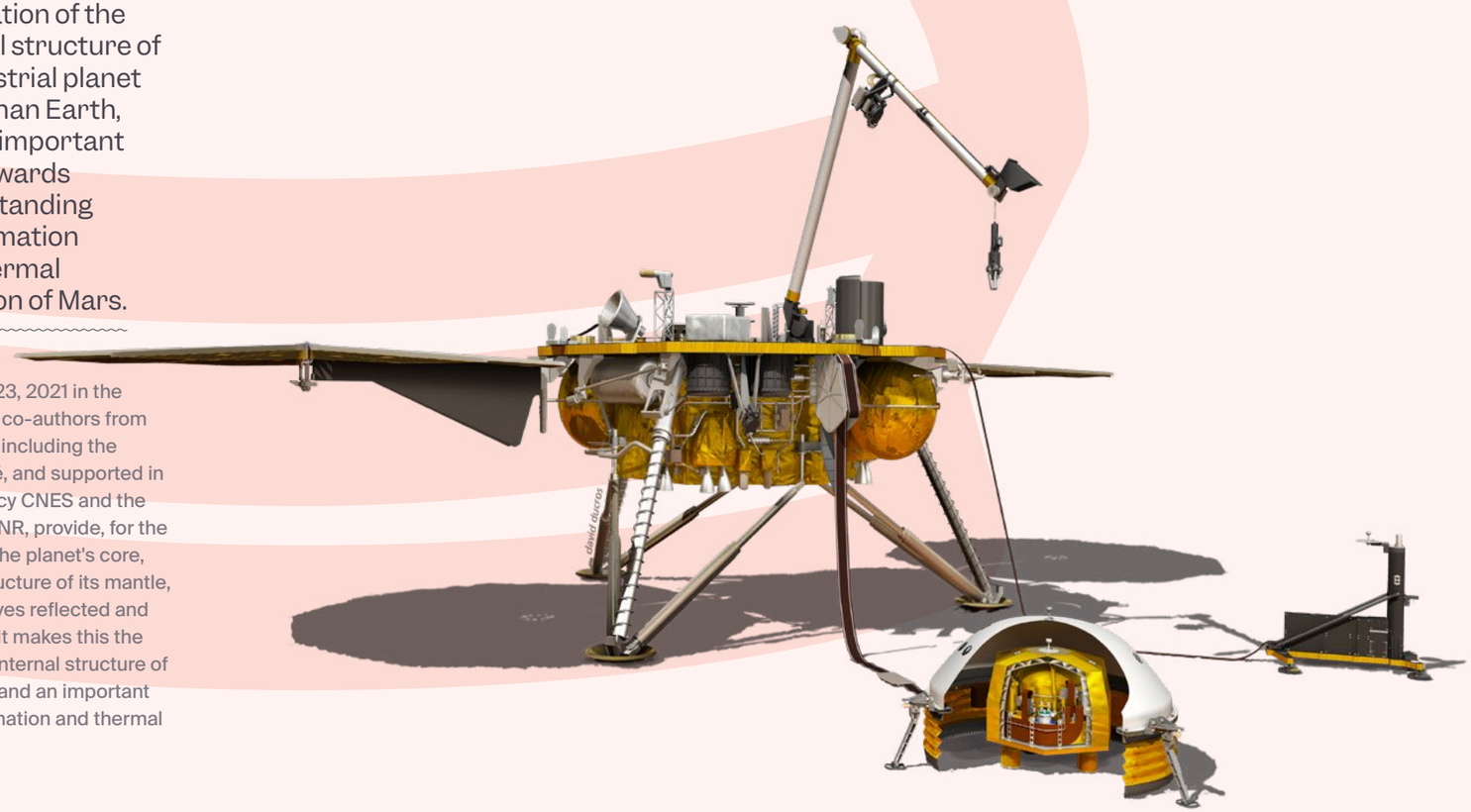
Using information obtained from around a dozen earthquakes detected on Mars by the Very Broad Band SEIS seismometer, developed in France, the international team of NASA's InSight mission has unveiled the internal structure of Mars.

It makes this the first ever seismic exploration of the internal structure of a terrestrial planet other than Earth, and an important step towards understanding the formation and thermal evolution of Mars.

The three papers published on July 23, 2021 in the journal Science, involving numerous co-authors from French institutions and laboratories, including the CNRS, the IPGP, Université Paris Cité, and supported in particular by the French space agency CNES and the French National Research Agency ANR, provide, for the first time, an estimate of the size of the planet's core, the thickness of its crust and the structure of its mantle, based on the analysis of seismic waves reflected and modified by interfaces in its interior. It makes this the first ever seismic exploration of the internal structure of a terrestrial planet other than Earth, and an important step towards understanding the formation and thermal evolution of Mars.

With the successful deployment of the SEIS experiment on the surface of Mars in early 2019, the mission scientists, including the 18 French co-authors involved and affiliated to a wide range of French institutions and laboratories, together with their colleagues from ETH in Zurich, the University of Cologne and the Jet Propulsion Laboratory in Pasadena, collected and analysed seismic data over one Martian year (almost two Earth years).

It should be pointed out that to simultaneously determine a structural model, the (arrival) time of an earthquake, and its distance, more than one station is usually required. However, on Mars the scientists only have one station, InSight. It was therefore necessary to search the seismic records for the characteristic features of waves that had interacted in various ways with the internal structures of Mars, and identify and validate them. These new measurements, coupled with mineralogical and thermal modelling of the planet's internal structure, have made it possible to overcome the limitation of having a single station.

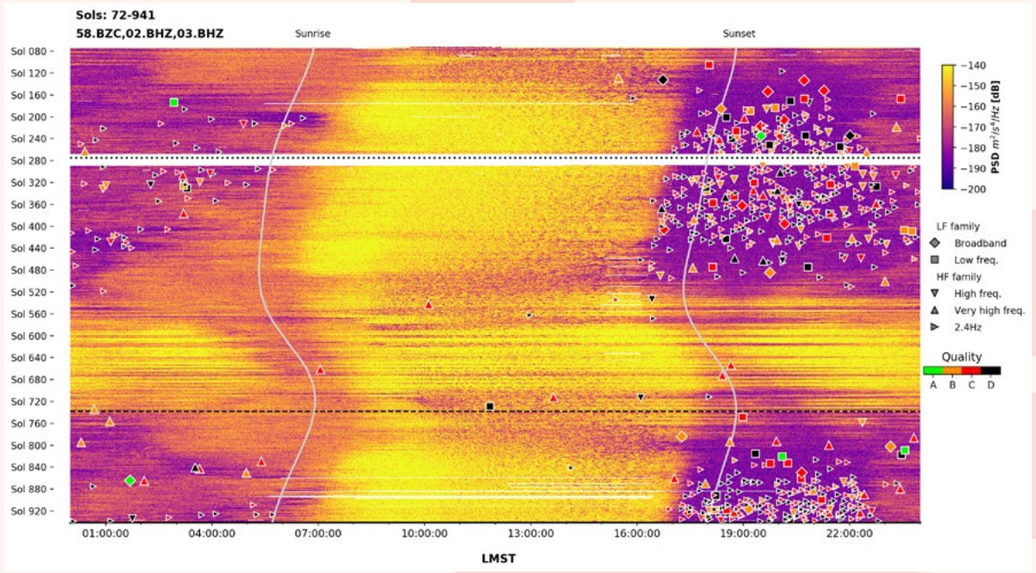


sommaire/contents

Une seule station, de multiples résultats
A single station, multiple findings

L'autre difficulté résultait de la faible sismicité de la planète rouge et du bruit sismique généré par son atmosphère : sur Terre, les séismes sont bien plus forts et les sismomètres mieux installés, dans des caves ou sous terre, ce qui permet d'obtenir une image précise de l'intérieur de la planète. Il fallait donc porter une attention particulière aux données. « Mais même si les séismes martiens ont une magnitude relativement faible et inférieure à 3,5, la très grande sensibilité du capteur VBB et le bruit très faible en début de nuit nous ont permis d'aboutir aux découvertes que nous ne pensions possibles, il y a deux ans, qu'avec des séismes de magnitude plus grande que 4 » précise Philippe Lognonné, professeur à Université Paris Cité et responsable scientifique de l'instrument SEIS à l'IPGP.

Another difficulty on Mars is its low seismicity and the seismic noise generated by its atmosphere. On Earth, earthquakes are much stronger, while seismometers are more effectively located in vaults or underground, making it possible to obtain an accurate image of the planet's interior. As a result, special attention had to be paid to the data. "But although Martian earthquakes have a relatively low magnitude, less than 3.5, the very high sensitivity of the VBB sensor combined with the very low noise at nightfall enabled us to make discoveries that, two years ago, we thought were only possible with earthquakes with a magnitude greater than 4," explains Philippe Lognonné, Professor at Université Paris Cité and the Principal Investigator for the SEIS instrument at the IPGP.

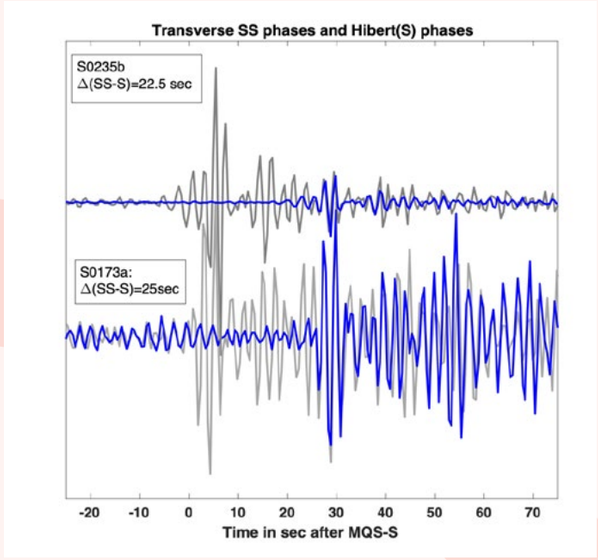


Évolution du bruit micro-sismique martien sur la composante verticale du capteur VBB entre le sol 72 et le sol 941. On remarque tout à la fois les variations journalières du bruit, avec un bruit très faible la nuit, et les variations annuelles, avec un fort bruit durant les nuits de l'automne et de l'hiver. Les symboles indiquent les évènements détectés, ces derniers étant soit des évènements longue période (Low Frequency), large bande (Broad band) ou hautes fréquences. La qualité des évènements est indiquée en couleur.

Evolution of the Martian microseismic noise on the vertical component of the VBB sensor between sol 72 and sol 941. We note both the daily variations of the noise, with very low noise at night, and the annual variations, with high noise during the nights of autumn and winter. The symbols indicate the events detected, which are either Low Frequency, Broad band or High frequency events. The quality of the events is indicated in colour.

Les données, traitées et transmises par le CNES et le service national d'observation InSight (IPGP-CNRS) aux scientifiques, ont donc été quotidiennement et soigneusement nettoyées du bruit ambiant, dû au vent

Every day, the data, processed by the CNES, the IPGP and the CNRS, and transferred to the scientists, was carefully cleaned of ambient noise (wind and deformation related to rapid temperature changes). The



Exemple de détection des ondes réfléchies SS sur la composante verticale de deux évènements provenant de Cerberus Fossae. Le signal gris est le signal brut, alors que le signal bleu est tout à la fois décalé en temps et corrigé en amplitude de la réflexion des ondes SS. La coïncidence des formes d'ondes permet de mesurer les coefficients de réflexion des phases SS et la différence entre les temps d'arrivée des ondes S et SS. Ces différences de temps de propagation permettent alors de contraindre les variations avec la profondeur de la vitesse des ondes de cisaillement dans la lithosphère martienne et ainsi le gradient thermique dans la lithosphère.

Example of SS reflected wave detection on the vertical component of two events from Cerberus Fossae. The grey signal is the raw signal, while the blue signal is both time-shifted and amplitude-corrected for the SS reflection. The coincidence of the waveforms makes it possible to measure the reflection coefficients of the SS phases and the difference between the arrival times of the S and SS waves. These differences in propagation times can then be used to constrain the variations with depth of the shear wave velocity in the Martian lithosphere and thus the thermal gradient in the lithosphere.

et aux déformations liées aux changements rapides de température. L'équipe internationale du Mars Quake Service (MQS) a quotidiennement répertorié les évènements sismiques : plus de 600 ont été catalogués dont plus de 60 correspondent à des séismes relativement lointains.

Parmi ces derniers, une dizaine comportent des informations sur la structure profonde : « Les ondes sismiques directes d'un séisme sont un peu le son de notre voix en montagne, qui génère des échos. Ce sont les échos de ces ondes, provenant d'une réflexion sur le noyau ou à l'interface croûte-manteau ou même à la surface de Mars, que nous avons recherchés dans les signaux grâce à leur similarité par rapport aux ondes directes » explique Philippe Lognonné.

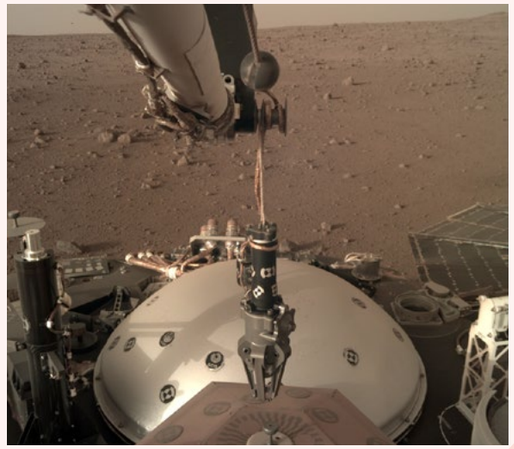
international Mars Quake Service team (MQS) recorded the seismic events on a daily basis: more than 600 have now been catalogued, of which over 60 were caused by relatively distant earthquakes.

Around ten of the latter contain information about the planet's deep structure: "The direct seismic waves from an earthquake are a bit like the sound of our voices in the mountains: they produce echoes. And it was these echoes, reflected off the core, or at the crust-mantle interface or even the surface of Mars, that we looked for in the signals, thanks to their similarity to the direct waves," Lognonné explains.

Une croûte altérée, un manteau dévoilé et un grand noyau liquide
An altered crust, a mantle revealed, and a large liquid core

En comparant les comportements des ondes sismiques, lors de la traversée de la croûte avant d'atteindre la station InSight, plusieurs discontinuités dans la croûte ont été identifiées : une première, observée à environ 10 km de profondeur, marque la séparation entre une structure très altérée, résultant d'une très ancienne circulation de fluide et une croûte peu

By comparing the behaviour of seismic waves as they travelled through the crust before reaching the InSight station, several discontinuities in the crust were identified: the first, observed at a depth of about 10 km, marks the boundary between a highly altered structure, resulting from circulation of fluid a very long time ago, and crust that is only slightly altered. A second



altérée. Une deuxième discontinuité vers 20 km puis une troisième, moins marquée vers 35 km, révèlent la stratification de la croûte sous InSight. « Nous avons utilisé toutes les méthodes d'analyse récentes, tant sur les séismes d'origine tectonique que sur les vibrations d'origine environnementale (le bruit sismique) pour identifier ces discontinuités » précise Benoit Tauzin, maître de conférence à l'Université de Lyon et chercheur au LGL-TPE.

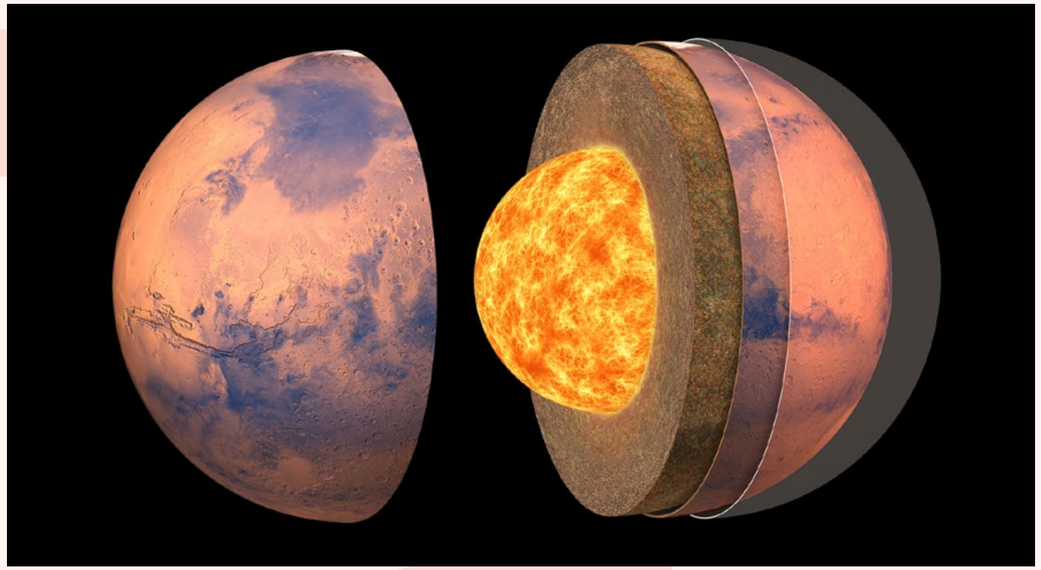
Dans le manteau, ce sont les différences entre le temps de parcours des ondes générées directement lors du séisme et celui des ondes générées lors de la réflexion de ces ondes directes sur la surface qui ont été analysées. Ces différences permettent avec une seule station, de déterminer la structure du manteau supérieur, et notamment la variation des vitesses sismiques avec la profondeur. Or, ces variations sont liées à la température. « Ceci nous permet d'estimer le flux de chaleur de Mars, qui serait de trois à cinq fois plus faible que celui de la Terre et d'émettre des contraintes sur la composition de la croûte martienne qui concentrerait plus de la moitié des éléments radioactifs producteurs de chaleur présents dans la planète », ajoute Henri Samuel, chargé de recherche CNRS à l'IPGP.

Enfin, dans la troisième étude, les scientifiques ont recherché les ondes réfléchies par la surface du noyau martien, dont la mesure du rayon est un des principaux résultats de la mission InSight. « Pour cela, explique Mélanie Drilleau, ingénieur de recherche à l'ISAE-SUPAERO, nous avons testé plusieurs milliers de modèles de manteau et de noyau par rapport aux phases et signaux observés ». Malgré les faibles amplitudes des signaux associés aux ondes réfléchies (appelées ScS), un excès d'énergie est observé pour les noyaux avec un rayon entre 1790 km et 1870 km. Une telle taille implique la présence d'éléments légers dans le noyau liquide et a des conséquences majeures sur la minéralogie du manteau à l'interface manteau/noyau.

discontinuity around 20 km down, and a third, less pronounced one at around 35 km, shed light on the stratification of the crust beneath InSight: "To identify these discontinuities, we used all the most recent analytical methods, both with earthquakes of tectonic origin and with vibrations caused by the environment (seismic noise)," says Benoit Tauzin, Senior Lecturer at the University of Lyon and a researcher at LGL-TPE.

In the mantle, the scientists analysed the differences between the travel time of the waves produced directly during the earthquake, and that of the waves generated when these direct waves were reflected off the surface. These differences made it possible, using only a single station, to determine the structure of the upper mantle, and in particular the variation in seismic velocities with depth. However, such variations in velocity are related to temperature. "That means we can estimate the heat flow of Mars, which is probably three to five times lower than the Earth's, and place constraints on the composition of the Martian crust, which is thought to contain over half the heat-producing radioactive elements present in the planet," adds Henri Samuel, a CNRS researcher at the IPGP.

Finally, in the third study, the scientists looked for waves reflected off the surface of the Martian core, the measurement of whose radius was one of the main achievements of the InSight mission. "To do this, explains Mélanie Drilleau, a research engineer at ISAE-SUPAERO, we tested several thousand mantle and core models against the phases and signals observed." Despite the low amplitudes of the signals associated with the reflected waves (known as ScS waves), an excess of energy was observed for cores with a radius between 1790 km and 1870 km. Such a large size implies the presence of light elements in the liquid core and has major consequences for the mineralogy of the mantle at the mantle/core interface.



Objectifs atteints et premiers impacts
Objectives achieved and first impacts

Après plus de deux ans de surveillance sismique martienne, le premier modèle de la structure interne de Mars est obtenu, et ce jusqu'au noyau.

Mars rejoint ainsi la Terre et la Lune dans le club des planètes et satellites telluriques dont la structure profonde est explorée par la sismologie. Mais la moisson de résultats ne s'arrête pas là : le 5 septembre 2021, un signal atypique était détecté pour la première fois après un évènement sismique, correspondant a priori à une onde sonore. L'analyse de ce signal suggérait qu'il était associé à une explosion de surface, située à environ 86 km au sud-est d'InSight, une zone que le satellite de la NASA MRO a observée pour y découvrir... un nouveau cratère. Le premier impact était ainsi identifié par SEIS et MRO, dernier objectif scientifique de la mission !

More than two years of seismic monitoring has resulted in the very first model of the internal structure of Mars, right down to the core.

Mars thus joins the Earth and the Moon in the select club of terrestrial planets and moons whose deep structures have been explored by seismologists. But the results do not stop there: on 5 September 2021, an atypical signal was detected for the first time after a seismic event, corresponding a priori to a sound wave. Analysis of this signal suggested that it was associated with a surface explosion, located about 86 km south-east of InSight, an area that NASA's MRO satellite observed and discovered... a new crater. The first impact was thus identified by SEIS and MRO, the mission's final scientific objective!

Enseignement
Teaching

sommaire/contents

Cette année encore, la situation sanitaire a contraint les équipes pédagogiques de l'IPGP et d'Université Paris Cité à devoir s'adapter pour être en mesure de proposer des enseignements de qualité aux étudiants de licence et de master. L'année civile 2021 s'est ainsi décomposée en deux parties bien distinctes :

> Suite à une recrudescence de l'épidémie de covid-19, le premier semestre s'est une nouvelle fois déroulé en grande partie à distance. Toutefois, l'expérience acquise et les investissements techniques engagés en 2020 ont permis à cette seconde moitié de l'année universitaire 2020-2021 de se passer dans de meilleures conditions.

> Le second semestre de l'année 2021 a vu le retour des étudiants et des enseignants sur les différents sites, encadré par des mesures sanitaires très strictes et un respect des gestes barrières rigoureux. Une nouvelle promotion de L1 a ainsi pu commencer l'année universitaire 2021-2022 en présentiel, composée d'étudiants diplômés d'un baccalauréat inédit suite à la dernière réforme. Le choix des options de cette nouvelle formule du diplôme national a entraîné un niveau assez hétéroclite des primo-entrants dans l'enseignement supérieur. Pour y remédier, le département de la formation et des études doctorales (DFED) de l'IPGP a lancé plusieurs initiatives telles qu'un cours de « remise à niveau » avec l'aide de collègues des UFRs de mathématiques et de physique d'Université Paris Cité, le dédoublement des groupes de travaux dirigés, des séances d'interrogation orale ou encore du soutien scolaire.

Once again, the health situation throughout the year forced the teaching teams of the IPGP and Université Paris Cité to adapt in order to be able to offer quality teaching to bachelor and master students. The 2021 calendar year was thus split into two distinct parts:

> Following an upsurge in the COVID-19 epidemic, teaching in the first semester was once again largely conducted remotely. However, the experience gained and the technical investments made in 2020 made it possible for the second half of the 2020-2021 academic year to go ahead under better conditions.

> The second semester of 2021 saw the return of students and teachers to the different sites in compliance with strict health measures and rigorous hygiene practices. A new class of first-year students was thus able to begin the 2021-2022 academic year in the classroom. These were students having passed a new baccalaureate following the latest reform. The choice of options for this new national baccalaureate resulted in a rather disparate level of first-time entrants to higher education. To address this, the IPGP's Department of Education and Doctoral Studies (DFED) has launched several initiatives, including a 'foundation' course with the help of colleagues from the Faculties of Mathematics and Physics at Université Paris Cité, the doubling of tutorial groups, oral questioning sessions and academic support.

De nouvelles filières innovantes en licence
New innovative degree courses

Se former en sciences de la Terre et de l'environnement permet d'aborder à la fois des questions fondamentales, telles que l'exploration spatiale du Système solaire ou l'origine de la vie, mais aussi des problématiques environnementales telles que les risques volcaniques, sismiques ou liés aux pollutions. Devenues globales et quantitatives, ces sciences font appel aussi bien aux mathématiques qu'à la physique, la chimie, la géologie ou encore la biologie. Les étudiants, qu'ils aient choisi la voie appliquée ou fondamentale, apprennent à observer des objets naturels, savoir calculer et construire des modèles simples basés sur les lois physiques et chimiques.

An education in Earth and environmental sciences enables students to tackle both fundamental questions, such as space exploration of the solar system or the origins of life, and environmental issues such as volcanic, seismic or pollution-related risks. These sciences have become global and quantitative, drawing on mathematics in addition to physics, chemistry, geology and biology. Whether students opt for the applied or fundamental path, they learn to observe natural objects, to calculate and to construct simple models based on physical and chemical laws.

L'année écoulée a vu l'installation de nouvelles filières innovantes et de très bon niveau, en collaboration avec des partenaires académiques parisiens. Ces formations s'appuient sur des cours déjà existants dans la licence Sciences de la Terre de l'IPGP :

The past year has seen the creation of new innovative, high-level courses in collaboration with academic partners in Paris. These courses are based on teaching currently provided for the IPGP's Earth Sciences degree:

> Nouveau parcours « Politiques de la Terre » IPGP-Sciences Po
New course on "Politics of the Earth" IPGP-Sciences Po

Depuis la rentrée universitaire 2020, l'IPGP propose un double diplôme en sciences humaines et sociales et en géosciences, conçu en partenariat avec Sciences Po. Véritable innovation pédagogique de ce programme, des cours interdisciplinaires sont conçus par des enseignants-chercheurs issus des deux institutions. Intitulée « Politiques de la terre », ou PoTerre, cette formation invite les étudiants à réfléchir sur la dynamique de notre planète et les défis actuels liés à l'activité des sociétés tels que l'adaptation aux changements globaux, la transition énergétique ou encore la gestion durable des ressources. Ainsi, les deux cours principaux de L1 et L2 s'intitulent : « Les géosciences à l'heure de l'Anthropocène » et « Aléas, risques et sociétés ».

Since the start of the 2020 academic year, the IPGP has been offering a dual degree in the humanities and social sciences with geosciences, designed in partnership with Sciences Po.
The new teaching feature of this programme is that interdisciplinary courses are conceived by faculty members who are also researchers, and this from both institutions. Entitled "Politics of the Earth", this course invites students to reflect on the dynamics of our planet and the current challenges linked to the activity of societies, such as adaptation to global changes, the energy transition or the sustainable management of resources. The main two courses in the first and second years are therefore: "Geosciences in the Anthropocene" and "Hazards, risks and societies".

À l'issue de quatre années de formation, dont une à l'international, les 20 étudiants sélectionnés obtiennent une licence en sciences de la Terre de l'IPGP et un Bachelor of Arts and Sciences de Sciences Po. Les deux premières années du programme s'appuient à la fois sur les enseignements de premier cycle de Sciences Po dispensés sur le campus parisien et sur ceux en sciences dispensés par l'IPGP. Les cours se déroulent dans les deux établissements.

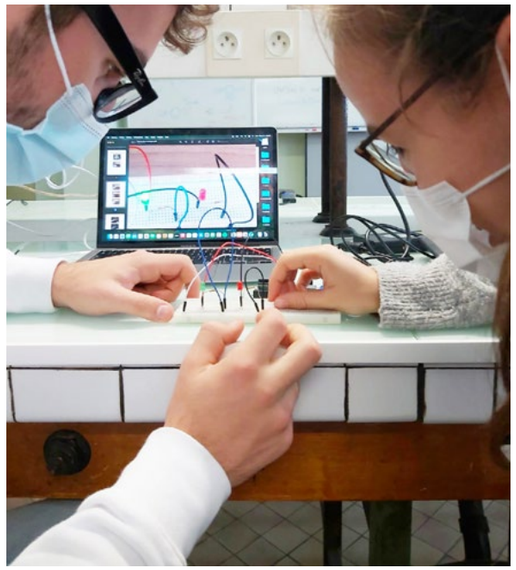
La troisième année se déroule à l'étranger, dans l'une des universités partenaires des deux institutions. La quatrième année est essentiellement consacrée à l'approfondissement des enseignements scientifiques à l'IPGP, complétés par des cours interdisciplinaires proposés par les deux institutions partenaires. Elle sera mise en place pour la première fois à la rentrée 2023 via la création d'un nouveau parcours de L3 intitulé « Géosciences et politiques » qui viendra compléter l'offre de formation de la licence en sciences de la Terre. Les élèves diplômés choisiront, conformément à leur projet professionnel, de poursuivre leurs études au sein de l'un des masters de l'IPGP, de Sciences Po ou d'entamer une autre formation en France ou à l'international.

At the end of four years of higher education, including one year abroad, the 20 students selected will obtain a Bachelor's degree in Earth Sciences from the IPGP and a Bachelor of Arts and Sciences from Sciences Po. The first two years of the programme are based on both the Sciences Po undergraduate courses taught on the Paris campus and those in science taught by the IPGP. The students attend classes in both institutions.

The third year is spent abroad at one or other of the institutions' partner universities. The fourth year is essentially devoted to more in-depth scientific teaching at the IPGP, complemented by interdisciplinary classes provided by the two partner institutions. It will be rolled out for the first time at the start of the 2023 academic year via the creation of a new L3 course entitled "Geosciences and Politics", which will bring teaching for the Earth Sciences degree to completion. Depending on their career goals, graduates may choose to continue their studies within one of the IPGP's or Sciences Po's master's degrees or to start another course in France or abroad.

> Création d'un Cycle Pluridisciplinaire d'Études Supérieures (CPES) : la rigueur de la classe préparatoire, l'ouverture de l'université
Creation of a Multidisciplinary Higher Education Course (CPES): combining the rigour of preparatory classes with the openness of university

Fruit d'une collaboration inédite entre le lycée Janson de Sailly et Université Paris Cité, ce CPES propose deux parcours de licence originaux, interdisciplinaires et de haut niveau sur des thématiques porteuses que sont la santé et l'environnement. Sélectifs, exigeants, pédagogiquement innovants, ces parcours veulent réunir les compétences de ces deux univers de l'enseignement supérieur : Université et CPGE. Les enseignements de type classe préparatoire à Janson de Sailly permettent aux étudiants d'acquérir de solides bases théoriques dans chaque champ disciplinaire tout en les formant à la rigueur à travers les colles et les devoirs surveillés. Les enseignements à Université Paris Cité permettent quant à eux de développer les savoir-faire et compétences scientifiques nécessaires à la conduite de projets de recherche, ainsi qu'au suivi d'enseignements spécialisés.



Le parcours « Environnement et énergies nouvelles » (2E) accueille depuis septembre 2021 18 étudiants au sein de la licence sciences de la Terre à l'IPGP. Il propose un enseignement de haut niveau en mathématiques, physique, chimie et biologie avec une part croissante d'enseignements spécialisés en géosciences de l'environnement, dispensés à l'IPGP. Les thématiques abordées s'articulent autour des grandes questions environnementales et sociétales telles que la place des géosciences à l'heure de l'Anthropocène, le réchauffement climatique, les énergies nouvelles et le mix énergétique mondial... Un stage en laboratoire et des stages de terrain viennent compléter cette formation. Ces étudiants pourront intégrer les masters recherche de l'IPGP mais également certaines écoles d'ingénieurs.

The result of a unique collaboration between the Lycée Janson de Sailly and Université Paris Cité, this CPES offers two original, interdisciplinary and high-level degree courses on the dynamic themes of health and the environment. Selective, demanding and academically innovative, these courses aim to bring together the skills of these two worlds of higher education: University and preparatory class (CPGE). The preparatory classes at Janson de Sailly allow students to acquire a solid theoretical foundation in each field of study, while at the same time training them to be rigorous through exams and supervised assignments. The courses at Université Paris Cité enable students to develop the scientific know-how and skills needed to conduct research projects or go on to follow more specialized courses.

The "Environment and new energies" (2E) course has been taught to 18 students since September 2021 within the IPGP's Earth Sciences degree. It offers high-level teaching in mathematics, physics, chemistry and biology with an increasing share of specialized teaching in environmental geosciences, provided at the IPGP. The themes covered revolve around major environmental and societal issues such as the place of geosciences in the Anthropocene, global warming, new energy sources and the global energy mix. A laboratory internship and field placements supplement this academic course. These students will be able to register for research masters either at the IPGP or certain engineering schools.

> Ouverture de la licence ST aux licences Accès Santé (LAS)
Opening up of the Earth Sciences (ST) degree to Health Access degree students (LAS)

La licence Sciences de la Terre accueille depuis le début de l'année universitaire 10 étudiants en licences Accès Santé. Cette formation permet aux étudiants qui se projettent dans des études de santé de préparer un diplôme de licence Sciences de la Terre tout en suivant des enseignements en santé. Au cours des trois années de licence, l'étudiant pourra alors candidater deux fois à l'une des filières de santé proposées à Université Paris Cité.

Avec l'ouverture de ces trois parcours depuis la rentrée 2020, la licence Science de la Terre de l'IPGP se compose aujourd'hui de cinq populations différentes d'étudiants ayant tous comme point commun un intérêt fort pour les géosciences : certains s'intéressent aux disciplines fondamentales des sciences de la Terre, d'autres aux langues orientales ou asiatiques (double licence ASTER), certains étudiants à une formation orientée vers des écoles d'ingénieurs (CPES), d'autres encore aux sciences humaines et sociales (double diplôme PoTerre), et enfin une partie d'entre eux aux études de santé (LAS). Cette diversité d'horizons et de projets portée par les équipes pédagogiques du DFED est rendue possible par la recherche conduite à l'IPGP, qui s'adapte continuellement aux évolutions et problématiques du monde actuel.

Since the beginning of the academic year, the Earth Sciences degree course has hosted 10 students following a Health Access degree. This allows students who plan to study health to prepare a degree in Earth Sciences while also taking health courses. During the three years of the bachelor's degree, the student may apply twice for one of the health courses offered at Université Paris Cité.

With the opening of these three courses since the start of the 2020 academic year, the IPGP's Earth Sciences degree now comprises five different student populations, all of whom share a strong interest in geosciences: some are interested in the fundamental disciplines of Earth Sciences, others in oriental or Asian languages (ASTER dual degree), some in education geared towards engineering schools (CPES), still others in the humanities and social sciences (Politics of the Earth dual degree), and finally some in health studies (LAS). This diversity of perspectives and projects supported by the DFED teaching teams is made possible by the research carried out at the IPGP, which is constantly being tailored to remain relevant to ongoing changes and issues in today's world.

Études doctorales
Doctoral studies

De la conception à la réalisation de leur projet de recherche, les doctorants de l'IPGP-Université Paris Cité développent de multiples compétences théoriques, méthodologiques et techniques dans le domaine des sciences de la Terre et de l'environnement. Ils disposent, tout au long de leur doctorat d'une durée de trois ans, d'un contrat de travail leur permettant de pleinement s'impliquer dans leurs activités de recherche et de valoriser sur le long terme ce qui constitue souvent leurs premières expériences professionnelles. Chaque doctorant acquière ainsi des connaissances pointues au sein de son champ disciplinaire et évolue dans un cadre de travail privilégié pour échanger autour de son domaine d'expertise, avec ses pairs, la communauté scientifique au sens large mais aussi le grand public, en France ou à l'international.

Au cours de l'année 2021, face à l'impossibilité due à la pandémie de covid-19 de partir sur le terrain, participer à des conférences ou disposer de périodes de mobilité au sein de laboratoires étrangers, les doctorants ont su s'adapter admirablement en mobilisant d'autres ressources pour faire évoluer leurs projets de recherche, tout en menant à bien dans le temps imparti la réalisation de leur doctorat. Profitant d'une période d'amélioration des conditions sanitaires au printemps,

From the initial conception of a research project to its completion, IPGP-Université Paris Cité PhD candidates develop multiple theoretical, methodological and technical skills in the field of Earth and environmental sciences. Throughout their three-year doctorate, they have an employment contract that allows them to get fully involved in their research activities while looking ahead to the future by capitalizing on what is often their first professional experience. Each PhD candidate thus acquires specialized knowledge within their field of study and evolves in a working environment that fosters dialogue and information exchange on their field of expertise with peers, the scientific community in the broadest sense of the term, and the general public, both in France and abroad.

Faced in 2021 with the impossibility of going out into the field, participating in conferences or working in foreign laboratories due to the COVID-19 pandemic, the PhD candidates were able to adapt admirably by mobilizing other resources in order to advance their research projects while completing their PhDs in the allotted time. Taking advantage of a period of improved health conditions in the spring, they spontaneously organised a three-day congress at the IPGP, which allowed many discussions to take place and a large

ils ont spontanément organisé un congrès de trois jours à l'IPGP, le « Congrès des Doctorants Déconfinés », qui a permis la tenue de nombreux échanges et à une vaste communauté scientifique de reconnaître la qualité de leurs recherches et leur capacité à communiquer autour de leurs domaines d'expertise.

Le service des études doctorales (SED) de l'IPGP, qui fait partie du département de la formation et des études doctorales (DFED), 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 et le collège des études doctorales et HDR (CED) d'Université Paris Cité. Unique dans le paysage de l'enseignement supérieur, cette structure peut s'appuyer sur les activités de recherche de l'institut pour fournir un cadre cohérent pour l'ensemble des missions de formation de l'IPGP autour des sciences de la Terre et de l'environnement. Son principal objectif est d'offrir des conditions de travail et des perspectives de carrière les meilleures possibles pour tous les doctorants.

scientific community to acknowledge the quality of their research and their ability to communicate on their fields of expertise.

The IPGP's Doctoral Studies Service (SED), which is part of the Department of Education and Doctoral Studies (DFED), leads and coordinates all the activities related to PhDs within the institution and UMR 7154, in close relation with the STEP'UP doctoral school and the college of doctoral studies and authorizations to supervise research (HDR - CED) of Université Paris Cité. Unique in the landscape of higher education, this structure can rely on the institute's research activities to provide a coherent framework for all the IPGP's teaching missions related to Earth and environmental sciences. Its main objective is to provide the best possible working conditions and career prospects for all PhD candidates.

Nouvelles thèses
New PhDs

34 nouvelles thèses commencées en 2021.

34 new PhDs started in 2021.

14 femmes.

14 women.

20 hommes.

20 men.

Thèses soutenues
Defended PhDs

26 thèses soutenues en 2021.

26 PhDs defended in 2021.

7 femmes.

7 women.

19 hommes.

19 men.

9 doctorants issus du master IPGP.

9 PhD candidates from the IPGP Master's degree.

25 doctorants hors master IPGP.

25 PhD candidates outside IPGP.

13 doctorants étrangers.

13 foreign PhDs candidates.

21 doctorants français.

21 French PhDs candidates.

Christian Laag

Suivi des changements climatiques et environnementaux anciens à travers l'Europe continentale

Tracking past climate and environmental change across continental Europe

La cyclicité des conditions glaciaires et interglaciaires, impulsée par les variations des paramètres orbitaux de la Terre (cycles de Milanković), favorise aux latitudes moyennes l'émission, le transport et le dépôt de lœss (limon éolien), ainsi que le développement des sols. À l'échelle mondiale, les séquences de lœss-paléosols représentent d'importantes archives paléoclimatiques. En Europe de l'Est, elles ont enregistré les changements climatiques tout au plus sur le dernier million d'années. À proximité de la ville de Pleven, au nord de la Bulgarie, au sein de la carrière de Suhia Kladenetz, une séquence de lœss-paléosols de 27 mètres de long a été échantillonnée en 2018, avec une haute résolution d'échantillonnage (2 cm), complétée en 2021 par un échantillonnage orienté.

Cette séquence, axe principal de mon projet de thèse, archive six complexes de paléosols sous le sol actuel, intercalés dans du lœss. Le modèle d'âge corrélatif

The cyclicity of glacial and interglacial conditions, triggered by variations in Earth's orbital parameters (Milanković cycles), favor over mid-latitudes the emission, transport and deposition of loess (aeolian silt) and the development of soils. In Eastern Europe, loess-paleosol sequences record past climate change over the last one million years, at most. Proximal to the city of Pleven, in northern Bulgaria, within the Suhia Kladenetz (SK) quarry, a 27 m long loess-paleosol sequence was sampled in 2018 at a very high (2 cm) continuous sampling resolution and oriented samples collected in 2021.

This sequence, main focus of my PhD project, archives six paleosol complexes below the present-day soil intercalated within loess and successfully correlated to well-dated global climate records indicating the SK sequence records the last 800 kyrs. Continuing analyses of an outcropping tephra and recognized

sommaire/contents

Campagne d'échantillonnage de septembre 2021 de la séquence de lœss-paléosols de la carrière de Suhia Kladenetz, près de la ville de Pleven (Bulgarie). Les unités de couleur brun-jaune-pâle sont le lœss qui s'accumule pendant les périodes sèches et froides (glaciaires). Les unités de couleur brun-rouge sont les paléosols, formés à partir du lœss pendant les périodes chaudes et humides (interglaciaires).

September 2021 sampling campaign of the loess-paleosol sequence in the Suhia Kladenetz quarry near the city of Pleven (Bulgaria). Pale yellowish brown units are loess accumulating during dry and cold (glacial) periods, and brownish-red units are paleosols, formed from the loess during warm and humid (interglacial) periods.

que j'ai développé suggère que les 800 000 dernières années sont archivées. Des analyses en cours de la couche de cendres volcaniques (tephra) observée et de crypto-tephras identifiés analytiquement, ainsi qu'une étude paléomagnétique permettra d'affiner et de préciser la (chrono-)stratigraphie de la séquence. Une approche pluridisciplinaire est entreprise, pour laquelle les paramètres magnétiques, granulométriques et colorimétriques sont étudiés. Collectivement, ces analyses permettent de mieux comprendre qualitativement les changements passés, par exemple, de la température, l'humidité, ou la force et la direction des vents.

cryptotephra as well as an on-going paleomagnetic study will refine and strengthen the (chrono-)stratigraphy of the sequence. Multi-disciplinary data including mineral magnetism, granulometry, and colorimetric parameters are acquired to gain qualitative insights into past climate changes of e.g., temperature, humidity, wind strength and direction.

Doctorant	Christian Laag
PhD candidate	*laag@ipgp.fr*
Directeurs de thèse	Dr. France Lagroix
PhD supervisors	*lagroix@ipgp.fr*
	Dr. Yohan Guyodo
	yohan.guyodo@ipgp.fr

sommaire/contents

Léa Ostorero

Corrélation entre réajustements du réservoir magmatique et signes précurseurs en surface : vers une horloge pré-éruptive

Correlation between magma reservoir readjustments and surface precursors: towards an "early-warning clock"

Réussir à estimer le temps qui sépare les réajustements pétrologiques à l'intérieur d'un réservoir magmatique et le début d'une éruption est un des défis majeurs posés par une crise volcanique. Cette échelle de temps, généralement peu contrainte, peut être estimée grâce à l'étude des cristaux formés au sein du réservoir et transportés par le magma lors d'une éruption. En effet, les zonations chimiques de ces cristaux (la composition chimique des bordures étant différente du cœur du cristal) résultent de cristallisations successives au cours du temps et permettent non seulement d'identifier les processus opérant dans le réservoir magmatique, mais également d'en établir la dynamique et la chronologie avant une éruption, sur les zonations les plus récentes.

L'objectif de ma thèse consiste à établir une corrélation entre ces réajustements et les signes précurseurs enregistrés en surface à partir des exemples des éruptions récentes des volcans du Kizimen et du Bezymianny au Kamchatka (Russie). Sur le premier volcan, ce temps pétrologique a pu être parfaitement corrélé avec les données des réseaux de surveillance qui ont enregistré une crise sismique débutant 18 mois avant l'éruption.

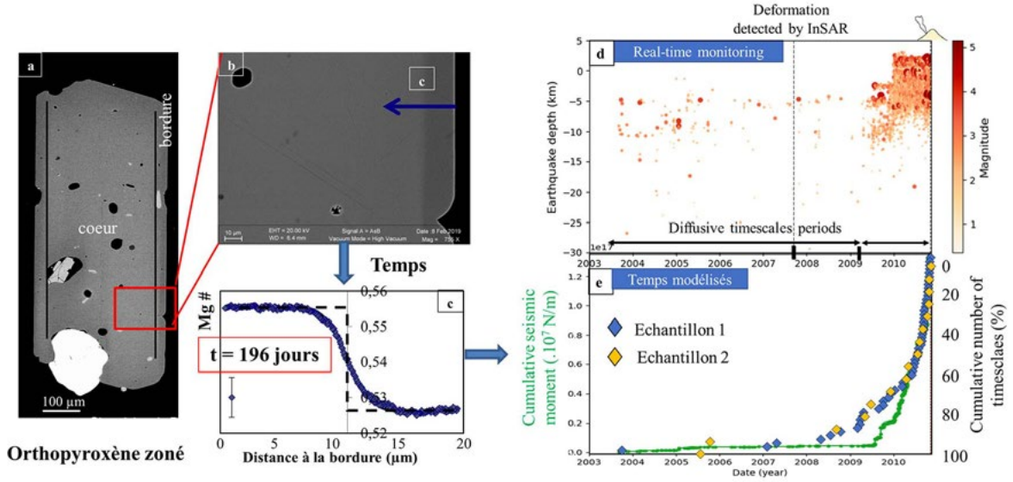
Dans le cas des volcans potentiellement à risque en cas de réactivation et où les zones de stockage des magmas sont stables dans le temps, de telles corrélations pourraient aboutir à l'établissement d'une horloge pré-éruptive (« early warning clock ») particulièrement utile pour les autorités administratives en charge de la protection des populations.

One of the major challenges, in terms of volcanic risk and management of a volcanic crisis on a volcano, is the estimation of the time between readjustments in the magma reservoir and the beginning of the eruption. This timescale is often poorly constrained, but can be estimated by studying the crystals formed in the magma reservoir and carried by the magma during an eruption. Indeed, the chemical zonations of these crystals (the chemical composition of the edges being different from the core of the crystal) result from successive crystallizations in the course of time and allow not only to identify the processes operating in the magmatic reservoir, but also to establish the dynamics and the chronology before an eruption, on the most recent zonations.

The objective of my PhD is to establish a correlation between these readjustments and the precursory signs recorded on the surface from the examples of the recent eruptions of the volcanoes of Kizimen and Bezymianny in Kamchatka (Russia). On the first volcano, this petrological time was perfectly correlated with data from monitoring networks that recorded a seismic crisis beginning 18 months before the eruption.

In the case of volcanoes potentially at risk in case of reactivation and where the magma storage areas are stable in time, such correlations could lead to the establishment of an early warning clock particularly useful for the administrative authorities in charge of the protection of the populations.

Doctorante PhD candidate	Léa Ostorero *ostorero@ipgp.fr*
Directeurs de thèse PhD supervisors	Georges Boudon *boudon@ipgp.fr* Hélène Balcone-Boissard *helene.balcone_boissard@sorbonne-universite.fr*



Estimation du temps d'interdiffusion Fe-Mg caractérisant les processus magmatiques en profondeur avant une éruption à partir d'un cristal d'orthopyroxène zoné (a-c). Corrélation des données sismiques enregistrées avant l'éruption du Kizimen avec l'estimation des temps d'interdiffusion dans les cristaux : réactivation du système magmatique environ 18 mois avant l'éruption de 2010 (d-e ; Ostorero et al., en révision).

Estimation of the timescales of interdiffusion of Fe-Mg characterizing magmatic processes at depth, before an eruption from a zoned orthopyroxene crystal (a-c). Correlation of seismic data recorded before Kizimen eruption with estimated crystal interdiffusion timescales: reactivation of the magmatic system ~ 18 months before the 2010 eruption (d-e; Ostorero et al., in review).

Relations internationales
International relationships

sommaire/contents

Malgré une année 2021 une nouvelle fois marquée par la crise sanitaire, plusieurs outils ont été maintenus :

Despite the fact that 2021 has been once again marked by the Covid-19 crisis, several actions were maintained:

Bourses MIEM et SMARTS-UP
MIEM and SMARTS-UP scholarships

Pour attirer les meilleurs étudiants de master et de doctorat, des bourses annuelles MIEM (Mobilité Internationale Entrante en Master) sont distribuées aux étudiants étrangers, leur donnant accès à un cursus complet avec des cours en anglais. Ce dispositif a été complété en 2021 par l'appel d'offres SMARTS-UP, lancé par Université Paris Cité, qui vise à promouvoir l'internationalisation des formations de master et faciliter l'accueil des meilleurs étudiants internationaux, en vue du recrutement de futurs doctorants au sein de la Graduate School Earth Planets Universe. Neuf étudiants étrangers ont ainsi rejoint cette graduate school pour l'année académique 2020-2021 (7 bourses MIEM et 2 bourses SMARTS-UP).

To attract the best Masters students and PhD candidates, annual MIEM (International Incoming Mobility for Master) scholarships are distributed to foreign students, giving them access to a complete curriculum with courses in English. This scheme was completed in 2021 by the SMARTS-UP call for proposals, launched by Université Paris Cité, which aims to promote the internationalisation of Master's courses and facilitate the admission of the best international students, with a view to recruiting future PhD candidates within the Earth Planets Universe Graduate School. Nine foreign students have joined this graduate school for the 2020-2021 academic year (7 MIEM scholarships and 2 SMARTS-UP scholarships).

En savoir plus / Read more:
> u-paris.fr/graduate-schools/earth-planets-universe/

Coordination du programme d'invitation
Coordination of the Invitation Programme

Les professeurs invités contribuent efficacement aux projets scientifiques communs et aux échanges d'étudiants. Plus d'une quarantaine de professeurs et chercheurs du monde entier ont été invités durant l'année académique 2020-2021 pour une durée d'au moins un mois. Malheureusement, seuls six de ces scientifiques invités se sont finalement rendus à l'IPGP l'année dernière compte tenu de la situation sanitaire.

Visiting professors contribute effectively to joint scientific projects and student exchanges. More than 40 professors and researchers from all over the world have been invited during the academic year 2020-2021 for at least one month. Unfortunately, only six of these visiting scientists finally came to the IPGP last year due to the sanitary crisis.

Chaires Circle U.
Circle U. Chairs

L'objectif du programme de chaires académiques Circle U. est d'assurer des liens solides et durables entre les universités partenaires, entre la recherche et l'enseignement, entre les étudiants et le personnel, ainsi qu'entre les universités et la société. En 2021, des chaires académiques ont été ouvertes aux membres du personnel permanents qui consacreront 20% de leur temps de travail à Circle U. En rejoignant ce réseau de coopération interuniversitaire et interdisciplinaire, les étudiants et les professeurs auront l'opportunité d'appréhender des environnements d'apprentissage académiques, sociaux et culturels diversifiés et innovants. Ces chaires travailleront en réseau et seront les forces motrices des pôles de connaissances (ou « Knowledge Hubs ») sur la santé, la démocratie ou le climat, mais également de l'Open School of Public Governance, de l'innovation et l'entrepreneuriat étudiants ou encore du Think and Do Tank sur l'avenir de l'enseignement supérieur.

The aim of the Circle U. academic chairs programme is to ensure strong and sustainable links between partner universities, between research and teaching, between students and staff, and between universities and society. In 2021, academic chairs have been opened for permanent staff members who will devote 20% of their working time to Circle U. By joining this network of inter-university and interdisciplinary cooperation, students and professors will have the opportunity to experience diverse and innovative academic, social and cultural learning environments. These Chairs will work in a network and will be the driving forces behind the Knowledge Hubs on health, democracy or climate, but also the Open School of Public Governance, student innovation and entrepreneurship or the Think and Do Tank on the future of higher education.

Dans le cadre du Knowledge Hub sur le climat qui explorera comment les universités peuvent contribuer aux problèmes urgents du changement climatique et qui examinera les implications du pacte vert pour l'Europe, le Dr. Alexandre Gélabert, professeur associé en biogéochimie à Université Paris Cité et à l'IPGP, a été sélectionné comme le représentant d'UPC au sein de Circle U. Responsable de l'équipe de géomicrobiologie de l'IPGP depuis 2019, ses recherches sont consacrées au cycle environnemental des métaux, avec un fort accent sur le rôle exercé par les microorganismes sur ces cycles.
Contact : gelabert@ipgp.fr

As part of the Climate Knowledge Hub, which will explore how universities can contribute to the urgent problems of climate change and examine the implications of the Green Deal for Europe, Dr. Alexandre Gélabert, Associate Professor in Biogeochemistry at Université Paris Cité and the IPGP, has been selected as the UPC representative in Circle U. Head of the geomicrobiology team at the IPGP since 2019, his research is dedicated to the environmental cycle of metals, with a strong focus on the role exerted by microorganisms on these cycles.

Université franco-allemande - UFA
Franco-German University - UFA

Depuis fin 2021, l'IPGP est membre à part entière de l'Université franco-allemande (UFA), qui a pour mission de promouvoir les relations et les échanges entre établissements d'enseignement français et allemands, en apportant son soutien à des projets binationaux dans le domaine de l'enseignement, tant au niveau des premiers que des seconds cycles, de la recherche et de la formation de futurs chercheurs.
Contact : perrier@ipgp.fr

Since the end of 2021, the IPGP is a full member of the Franco-German University (UFA), whose mission is to promote relations and exchanges between French and German educational institutions, by supporting bi-national projects in the field of teaching, both at undergraduate and graduate levels, research and training of future researchers.

Memoranda of understanding (MoUs)*
Memoranda of understanding (MoUs)*

Deux nouveaux MoUs ont été signés en 2021 avec :

- la School of Earth System Science de l'université de Tianjin (Chine), qui vise à faciliter les échanges de chercheurs lors de mission de terrain ainsi que d'étudiants et de doctorants lors de séjours de recherche ou d'enseignement d'une durée de 6 à 24 mois.
Contact : international@ipgp.fr

Two new MoUs were signed in 2021 with:

- the School of Earth System Science of Tianjin University (China), which aims to facilitate exchanges of researchers during field missions as well as students and PhD candidates during research or teaching stays lasting from 6 to 24 months.

sommaire/contents

- l'Indian Institute of Science Education & Research de Pune (Inde), qui a pour objet l'attribution d'un double diplôme de master dans le domaine des sciences de la Terre et dont l'enseignement est entièrement dispensé en anglais : International Master of Research in Solid Earth Sciences (IMSES - mis en place au niveau M2 uniquement) et le programme de télédétection Fundamentals of Remote Sensing (FRS, année M2 enseignée en anglais).
Contacts : carton@ipgp.fr ; busigny@ipgp.fr ; jacquemoud@ipgp.fr

- the Indian Institute of Science Education & Research in Pune (India), which aims to award a double Master's degree in the field of Earth Sciences, taught entirely in English: International Master of Research in Solid Earth Sciences (IMSES - implemented at M2 level only) and the Fundamentals of Remote Sensing (FRS - M2 year taught in English).

Deux MoUs ont été renouvelés en 2021 avec :

- le Earthquake Research Institute (ERI) de l'université de Tokyo (Japon), qui a fait l'objet d'un renouvellement pour cinq ans. Il permettra l'organisation en 2022 d'un colloque sur l'activité conjointe des deux institutions.

- le Centre National de Documentation et de Recherche Scientifique (CNRDS) des Comores, dans le cadre du projet INTERREG HATARI, qui vise à partager les expériences et compétences de chacun pour l'étude des systèmes volcaniques et sismogéniques, la surveillance et la communication des risques sismiques et volcaniques aux Comores. Cette activité commune implique l'OVPF-IPGP et le Laboratoire GéoSciences Réunion (LGSR) de l'Université de La Réunion qui collabore étroitement avec le CNDRS, notamment via l'Observatoire Volcanologique du Karthala (OVK).

*Un memorandum of understanding (MoU) est un accord formel entre deux parties ou plus, établissant un partenariat officiel.

Two MoUs were renewed in 2021 with:

- the Earthquake Research Institute (ERI) of the University of Tokyo (Japan), which was renewed for five years. It will allow the organisation in 2022 of a symposium on the joint activity of the two institutions.

- the Centre National de Documentation et de Recherche Scientifique (CNRDS) of the Comoros, within the framework of the INTERREG HATARI project, which aims to share experiences and skills in the study of volcanic and seismogenic systems, monitoring and communication of seismic and volcanic risks in the Comoros. This joint activity involves the OVPF-IPGP and the Laboratoire GéoSciences Réunion (LGSR) of the University of La Réunion, which collaborates closely with the CNDRS, in particular through the Karthala Volcanological Observatory (OVK).

*A memorandum of understanding (MoU) is a formal agreement between two or more parties, establishing an official partnership.

Organisation de workshop
Workshop organisation

Le workshop CLEEDI (Collaborative Exploration of Earth's Deep Interior) a pu être organisé du 23 au 27 août 2021, à Foix, en Ariège, malgré la crise sanitaire. Soutenu par l'IPGP, l'INSU, l'ENS, la communauté d'agglomération Pays Foix-Varilhes, l'EAGE, Frontiers et la Région Île-de-France, il a réuni une trentaine de participants venant de France, d'Allemagne, d'Italie et de Suisse. CLEEDI avait pour objectif de travailler de manière collaborative sur des petits projets rassemblant géodynamiciens, sismologues, pétrologues ou encore géologues en mode « hackaton ». Huit projets reliant la géochimie, la modélisation géodynamique et

The CLEEDI (Collaborative Exploration of Earth's Deep Interior) workshop was organised from 23 to 27 August 2021, in Foix, Ariège, despite the Covid-19 crisis. Supported by the IPGP, the INSU, the ENS, the "communauté d'agglomération Pays Foix-Varilhes", the EAGE, Frontiers and the Île-de-France Region, it brought together some thirty participants from France, Germany, Italy and Switzerland. CLEEDI's objective was to work collaboratively on small projects bringing together geodynamicists, seismologists, petrologists and geologists in a "hackaton" mode. Eight projects linking geochemistry, geodynamic modelling and

sommaire/contents

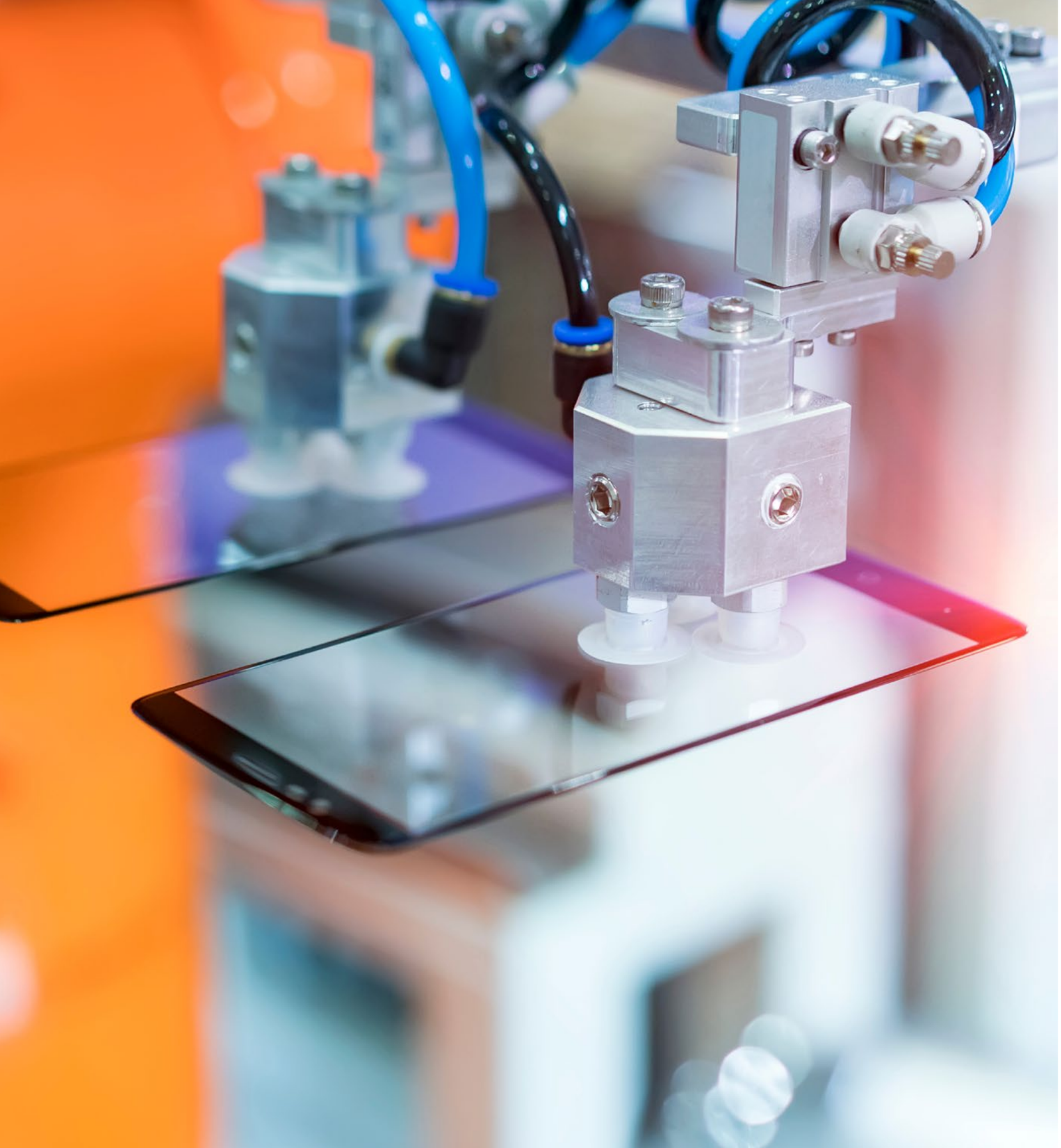
l'observation géophysique (sismologie/géomagnétisme) à plusieurs échelles ont été remontés. De nouvelles collaborations sont nées et une session à la prochaine EGU sera organisée, de même qu'un numéro spécial de Frontiers in Earth Sciences est prévu pour 2022.
Contact : nobuaki@ipgp.fr

geophysical observation (seismology/geomagnetism) at several scales were brought together. New collaborations have been formed and a session at the next EGU will be organised, as well as a special issue of Frontiers in Earth Sciences planned for 2022.

Scientifiques invités en 2021
2021 visiting scientists

Invité Guest	**Affiliation** Affiliation	**Invitant** Host	**Équipe** Team
BARBECOT Florent	*Université de Québec, Canada*	**AGRINIER Pierre**	Géochimie des isotopes stables Stable Isotope Geochemistry
GARCIA-CIASCO Antonio	*Université de Grenade, Espagne*	**ANGIBOUST Samuel**	Tectonique et mécanique de la lithosphère Lithosphere Tectonics and Mechanics
MINSHULL Tim	*University of Southampton, Royaume-Uni*	**FEUILLET Nathalie**	Géosciences marines Marine Geosciences
PAVLOV Vladimir	*Institut Schmidt de physique du globe de Moscou, Russie*	**GALLET Yves**	Paléomagnétisme Paleomagnetism
SHAHAR Anat	*Carnegie Institution, USA*	**BADRO James**	Cosmochimie, astrophysique et géophysique expérimentale Cosmochemistry, Astrophysics and Experimental Geophysics
THOMPSON Glenn	*University of South Florida, USA*	**METAXIAN Jean-Philippe**	Sismologie Seismology

sommaire/contents



Partenariats
Partnerships

sommaire/contents

L'année 2021 a vu la signature de deux CIFRE (Convention industrielle de formation par la recherche) qui ont permis le démarrage de nouvelles thèses en partenariat avec des industriels :

The year 2021 saw the signature of two CIFRE (Industrial Convention for Education through Research) which enabled the start of two new PhDs with industrial partners:

Corning
Corning

Cette société, reconnue mondialement pour ses innovations dans le domaine de la science des matériaux, produit notamment des verres spéciaux pour les marchés de l'affichage, de la pharmacie et de l'électronique grand public (les fameux « Gorilla Glass »), ainsi que des vitrocéramiques pour des applications techniques, des tables de cuisson et des fenêtres pare-feu. L'objectif de la thèse financée est de comprendre les interactions des éléments multivalents dans des verres de borosilicate et d'aluminosilicate fondus, à l'aide de méthodes de caractérisation in situ développées pour l'étude de laves volcaniques. La partie expérimentale sera complétée par une modélisation thermodynamique permettant de prédire l'état rédox de verres et silicates fondus contenant plusieurs éléments multivalents.
Contact : neuville@ipgp.fr

This company, known worldwide for its innovations in the field of materials science, produces special glass for the display, pharmaceutical and consumer electronics markets (the famous "Gorilla Glass"), as well as glass-ceramics for technical applications, cooktops and fireproof windows. The objective of the funded PhD is to understand the interactions of multivalent elements in fused borosilicate and aluminosilicate glasses, using in situ characterisation methods developed for the study of volcanic lavas. The experimental part will be completed by thermodynamic modelling to predict the redox state of molten glasses and silicates containing several multivalent elements.

CSTB
CSTB

Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment a pour ambition d'imaginer les bâtiments de demain et de sécuriser des projets de construction et de rénovation durable en anticipant les effets du changement climatique. Les effluents d'élevage et de l'industrie agroalimentaire tels que les lisiers, les jus d'ensilage et les lactosérums sont identifiés, dans la littérature, comme des milieux très agressifs pour les ouvrages agricoles en béton, du fait de la présence de bactéries et acides organiques potentiellement agressifs vis-à-vis de la matrice cimentaire. Cette propriété de détérioration par des agents biologiques est mise à profit pour réduire la matrice cimentaire des déchets amiantés de type fibro-ciment et en minimiser ainsi le volume pour leur inertage par vitrification. La recherche envisagée s'attache à déterminer les conditions optimales de réaction et à caractériser les effluents potentiellement produits ainsi que leur gestion au sein d'un réacteur expérimental.
Contact : vanhullebusch@ipgp.fr

The Scientific and Technical Center for Building (CSTB) aims to imagine the buildings of tomorrow and to secure sustainable construction and renovation projects by anticipating the effects of climate change. Livestock and food industry effluents such as slurry, silage juice and whey are identified in the literature as very aggressive media for agricultural concrete structures, due to the presence of bacteria and organic acids that are potentially aggressive towards the cement matrix. This property of deterioration by biological agents is used to reduce the cementitious matrix of asbestos-containing waste of the asbestos cement type and thus minimise its volume for vitrification. The research planned is aimed at determining the optimal reaction conditions and characterising the effluents potentially produced as well as their management within an experimental reactor.

sommaire/contents

D'autres projets scientifiques en partenariat avec le secteur industriel ont été mis en œuvre en 2021 :

Other scientific projects in partnership with the industrial sector were implemented in 2021:

Détection des explosions nucléaires souterraines par l'étude des rapports isotopiques du radioxénon
Detection of underground nuclear explosions by studying radioxenon isotope ratios

Les rapports isotopiques du radioxénon capturé dans l'atmosphère peuvent être des indicateurs de l'occurrence d'une explosion nucléaire souterraine. Dans le cadre d'un projet commun entre le U.S. Department of Energy , le CEA DAM-Île de France (DIF) et l'IPGP-Université Paris Cité, le modèle standard idéalisé de l'évolution des abondances isotopiques du radioxénon dans une cavité d'explosion nucléaire est remis en cause. En effet, ce modèle ne tient compte ni des effets des processus physiques entraînant le partage de l'inventaire des radionucléides entre une phase gazeuse et la roche fondue créée par la détonation, ni de la fuite continue des gaz de la cavité ou de la zone d'effondrement. L'application d'hypothèses plus réalistes sur l'état de la cavité de détonation donne des rapports d'activité isotopique qui diffèrent davantage du bruit de fond civil (production d'isotopes médicaux, réacteurs nucléaires...) que ne le suggère le modèle standard idéalisé, tout en réduisant la quantité de radioxénon disponible pour une libération dans l'atmosphère et une détection ultérieure. Les simulations indiquent que l'évolution physique de la cavité de détonation pendant le processus de partitionnement post-détonation influence fortement l'évolution isotopique dans la phase gazeuse. L'effondrement de la cavité a potentiellement le plus grand effet sur le partitionnement des produits de fission réfractaires qui sont les précurseurs du radioxénon. Le modèle permet d'envisager une utilisation de la sismicité post-détonation pour prédire l'évolution isotopique.

The isotope ratios of radioxenon captured in the atmosphere can be indicators of the occurrence of an underground nuclear explosion. In a joint project between the U.S. Department of Energy, the CEA DAM-Île de France (DIF) and the IPGP-Université Paris Cité, the standard idealized model of the evolution of radioxenon isotopic abundances in a nuclear explosion cavity is questioned. Indeed, this model does not take into account the effects of physical processes leading to the partitioning of the radionuclide inventory between a gaseous phase and the molten rock created by the detonation, nor does it take into account the continuous leakage of gases from the cavity or the collapse zone. Applying more realistic assumptions about the state of the detonation cavity results in isotopic activity ratios that differ more from the civilian background (medical isotope production, nuclear reactors...) than suggested by the standard idealised model, while reducing the amount of radioxenon available for release to the atmosphere and subsequent detection. Simulations indicate that the physical evolution of the detonation cavity during the post-detonation partitioning process strongly influences the isotopic evolution in the gas phase. The collapse of the cavity has potentially the greatest effect on the partitioning of refractory fission products which are the precursors of radioxenon. The model allows the use of post-detonation seismicity to predict isotopic evolution.

Carrigan C.R., Sun Y., Pili E., Neuville D.R., Antoun T.
Cavity-melt partitioning of refractory radionuclides and implications for detecting underground nuclear explosions.
Journal of Environmental Radioactivity, 2020
DOI 10.1016/j.jenvrad.2020.106269
Contacts neuville@ipgp.fr ; pili@ipgp.fr

sommaire/contents

Analyse des rejets atmosphériques de polluants chimiques des centrales nucléaires
Analysis of atmospheric releases of chemical pollutants from nuclear power plants

Un nouveau projet de collaboration entre EDF, le CEA et l'IPGP, sous la direction de Rémi Losno de l'équipe de biogéochimie environnementale, a débuté. EDF doit maîtriser les aspects règlementaires des rejets atmosphériques de polluants chimiques de ses centrales de production d'électricité nucléaire, mais aussi mieux connaître leur impact sur l'environnement. Les rejets ciblés concernent les différents antimicrobiens chlorés ajoutés dans l'eau des tours aéroréfrigérantes pour éviter les proliférations de pathogènes, ainsi que des additifs anti-corrosion présents pour protéger les circuits hydrauliques de l'installation. Une des caractéristiques de ces additifs est leur solubilité partielle dans l'eau et donc leur présence à la fois sous forme gazeuse et sous forme dissoute dans des microgouttelettes d'eau en suspension dans l'air. Le travail réalisé par l'IPGP comporte deux volets : un premier centré sur le prélèvement, comprenant le développement d'un dénudeur adapté à la séparation dans l'air ambiant des gaz et des gouttelettes en suspension pour obtenir la partition gaz/soluble des espèces cibles ; le second s'intéresse aux méthodes de mesure des polluants, en collaboration avec le CEA et le laboratoire ITODYS d'Université Paris Cité.
Contact : losno@ipgp.fr

A new collaborative project between EDF, the CEA and the IPGP, under the direction of professor Rémi Losno of the Environmental biogeochemistry team, has begun. EDF must control the regulatory aspects of atmospheric releases of chemical pollutants from its nuclear power plants, but also better understand their impact on the environment. The targeted discharges concern the various chlorinated antimicrobials added to the water in the cooling towers to prevent the proliferation of pathogens, as well as the anti-corrosion additives present to protect the plant's hydraulic circuits. One of the characteristics of these additives is their partial solubility in water and therefore their presence both in gaseous form and in dissolved form in micro-droplets of water suspended in the air. The work carried out by the IPGP is twofold: the first focuses on sampling, including the development of a denuder adapted to the separation of gases and suspended droplets in ambient air in order to obtain the gas/soluble partition of the target species; the second focuses on the methods for measuring the pollutants, in collaboration with the CEA and the ITODYS laboratory of Université Paris Cité.

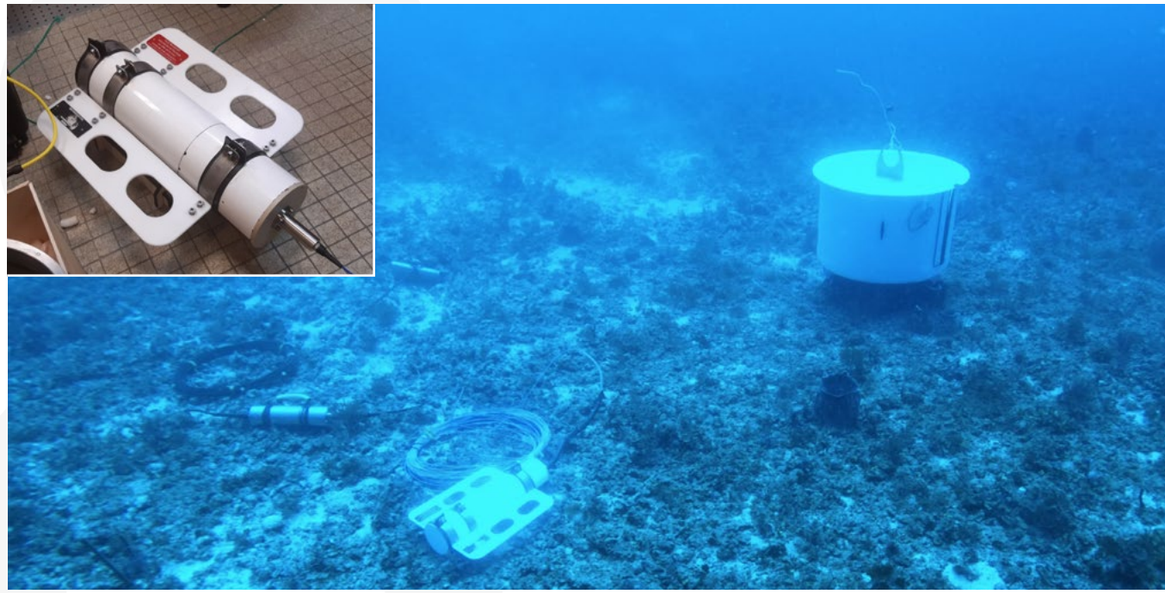
Sismologie optique avec l'ESEO
Optical seismology with ESEO

La coopération de l'IPGP avec l'école d'ingénieurs ESEO d'Angers s'est poursuivie en 2021, avec la finalisation d'un sismomètre optique sous-marin, conçu et développé par l'ESEO, puis son installation au mois de juin au large de l'archipel des Saintes, en Guadeloupe. Touchée par un séisme destructeur en 2004, cette zone présente depuis une activité sporadique sous forme de petites crises sismiques. Afin de mieux cerner les failles mises en jeu, le sismomètre a été installé en fond de mer, à la terminaison d'un câble optique de 5 km de long, dans le cadre du projet Interreg Caraïbes PREST. Les mesures sismiques sous-marines, télémétrées en temps réel à l'OVSG-IPGP et intégrées dans la surveillance quotidienne de l'observatoire, produisent des données à haute résolution.

Une mission IPGP-ESEO a également été lancée en septembre dans le cadre du projet ANR MONIDAS pour installer en test sur les flancs du volcan italien Stromboli un extensomètre à fibre optique de 5 m de long, construit par l'ESEO, branché à l'extrémité d'une fibre optique longue de 2 km. La sensibilité de cette dernière, enterrée en tranchée, a permis d'enregistrer efficacement les petites explosions courantes du volcan, ainsi qu'un signal particulièrement intéressant observé lors de l'explosion majeure du 6 octobre, avec une lente déformation durant les deux minutes précédant l'évènement, correspondant au gonflement de l'édifice sous la pression du magma.

The cooperation of the IPGP with the engineering school ESEO in Angers continued in 2021, with the completion of an underwater optical seismometer, designed and developed by ESEO, and its installation in June off the Saintes archipelago, in Guadeloupe. Affected by a destructive earthquake in 2004, this area has since experienced sporadic activity in the form of small seismic crises. In order to better identify the faults involved, the seismometer was installed at the bottom of the sea, at the end of a 5 km long optical cable, as part of the Interreg Caraïbes PREST project. The underwater seismic measurements, telemetered in real time to the OVSG-IPGP and integrated in the daily monitoring of the observatory, produced high resolution data.

An IPGP-ESEO mission was also launched in September as part of the ANR MONIDAS project to install a 5 m long fibre optic extensometer, built by ESEO, connected to the end of a 2 km long fibre optic cable on the slopes of the Italian volcano Stromboli. The sensitivity of this fibre, which is buried in a trench, has made it possible to efficiently record the volcano's common small explosions, as well as a particularly interesting signal observed during the major explosion of 6 October, with a slow deformation during the two minutes preceding the event, corresponding to the swelling of the edifice under the pressure of the magma.



Sismomètre optique sous-marin installé en juin 2021 à l'extrémité d'une fibre optique de 5 km de long au large des côtes des Saintes, Guadeloupe.
Underwater optical seismometer deployed in June 2021 at the end of a 5 km long optical fibre off the coast of Les Saintes, Guadeloupe.

Enfin, deux expériences de terrain sur des fibres optiques ont été montées avec l'ESEO, exploitant le système « DAS » (Distributed Acoustic Sensing), comprenant un équipement produit par la société Febus et partagé entre l'ESEO et l'IPGP. Cet instrument permet d'interroger de longues fibres optiques et d'en extraire le taux de déformation en de très nombreux points, pour des fréquences supérieures à 1 Hz. Le passage d'ondes sismiques produit ainsi l'équivalent de milliers de sismogrammes. Deux fibres de plus d'un kilomètre de long ont été installées et auscultées pendant plusieurs semaines à l'automne en Italie : l'une dans une région sismique des Appenins, en collaboration avec l'Université de Naples et l'autre sur les pentes du Stromboli, enregistrant les explosions, en collaboration avec l'Université de Florence. Leurs signaux sont en cours d'analyse.
Contact : bernard@ipgp.fr

Finally, two field experiments on optical fibres were set up with ESEO, using the "DAS" (Distributed Acoustic Sensing) system, comprising equipment produced by the Febus company and shared between ESEO and the IPGP. This instrument makes it possible to interrogate long optical fibres and to extract the rate of deformation at many points, for frequencies greater than 1 Hz. The passage of seismic waves thus produces the equivalent of thousands of seismograms. Two fibres more than a kilometre long were installed and monitored for several weeks in the autumn in Italy: one in a seismic region of the Appenines, in collaboration with the University of Naples, and the other on the slopes of Stromboli, recording explosions, in collaboration with the University of Florence. Their signals are currently being analysed.

Vie de l'établissement
Institution's life

#tournage
#shooting

Tournage de l'émission « Le monde de Jamy » intitulée « Quand nos volcans se déchaînent ! » à La Réunion en compagnie d'Aline Peltier, directrice de l'OVPF-IPGP.

Filming of the television programme "Le monde de Jamy" on volcanic activity on Reunion Island with Aline Peltier, director of the OVPF-IPGP.

#science
#science

Le projet participatif Ecorc'Air propose de collecter des écorces de platanes afin d'établir une cartographie précise de la pollution aux particules fines métalliques liée à la circulation automobile et de mesurer son évolution. À Paris, les échantillons peuvent être remis à l'IPGP.

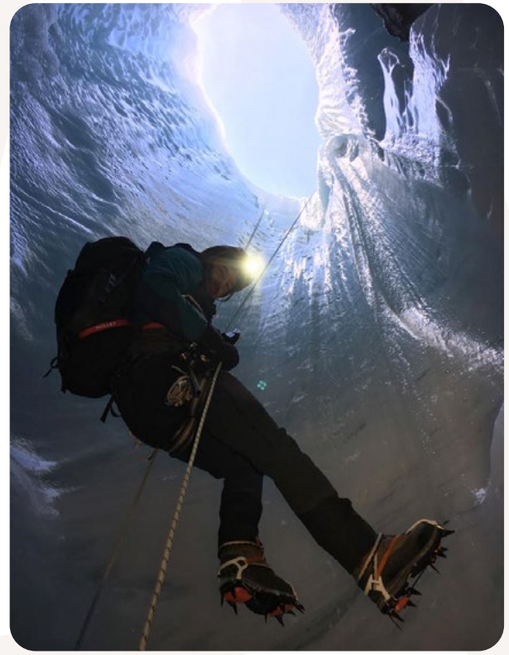
The Ecorc'Air participatory project proposes to collect plane tree bark samples in order to draw up a precise map of fine metal particle pollution linked to motor traffic and measure changes over time. In Paris, these samples can be handed in to the IPGP.

sommaire/contents

#science
#science

Yann Sivry descendant dans un « moulin » d'un glacier alpin - une crevasse élargie par les eaux de fonte - pour un prélèvement d'échantillons dans le but de tracer la répartition et la source des nanoparticules et leurs effets sur les êtres humains et l'environnement.

Yann Sivry descending into an Alpine glacier mill — a crevasse widened by meltwater — to take samples in order to trace the distribution and source of nanoparticles and their effects on humans and the environment.



#conférence
#conference

Conférence « L'enfance du système solaire : des premières planètes à la Terre » présentée par Marc Chaussidon et animée par Cécile Ferrari et Frédéric Moynier, dans le cadre du cycle de conférences exceptionnel organisé tous les mois pour le centenaire de l'IPGP.

Presentation on "The early solar system: from the first planets to Earth" by Marc Chaussidon, moderated by Cécile Ferrari and Frédéric Moynier, as part of the exceptional cycle of monthly presentations for the IPGP's centenary.

sommaire/contents

#évènement
#event

Visite de Frédérique Vidal, ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, à l'OVPF-IPGP à La Réunion.

Visit of Frédérique Vidal, French Minister for Higher Education, Research and Innovation, to the OVPF-IPGP on Reunion Island.

#science
#science

« Nettoyage » des panneaux solaires d'InSight : du sable martien est ramassé aux abords de l'atterrisseur puis saupoudré sur les panneaux afin que les grains de sable emportés par le vent entraînent avec eux les fines poussières accumulées depuis novembre 2018.

"Cleaning" InSight's solar panels: Martian sand is collected from around the lander and then sprinkled on the panels so that the windblown grains of sand carry away with them the fine dust that has built up since November 2018.

#tournage
#shooting

Tournage de portraits de femmes scientifiques de l'IPGP (ici avec Audrey Michaud-Dubuy et Anne Le Friant) dans le cadre de la Journée internationale des droits des femmes du 8 mars.

Filming of portraits of women scientists from the IPGP (here with Audrey Michaud-Dubuy and Anne Le Friant) for the International Women's Rights Day on 8 March.

#évènement
#event

« Congrès des Doctorants.e.s Déconfiné.e.s » : version réduite du congrès des doctorants habituel qui a permis de pallier les annulations 2020 et 2021 dues à la crise sanitaire. Le « CD³ » s'est tenu sur une journée avec présentation des posters des doctorants de l'école doctorale STEP'UP.

"Congrès des Doctorants.e.s Déconfiné.e.s": a reduced version of the usual PhD candidates' congress which made up for the cancellations in 2020 and 2021 due to the health crisis. The "CD³" was held over one day with the presentation of posters by PhD candidates from the STEP'UP doctoral school.

sommaire/contents

#science
#science

Stephan Borensztajn et Caroline Thaler remportent le Prix du public du concours photo « La preuve par l'image » organisé par le CNRS, pour leur photo intitulée « Le cri », représentant une colonie de bryozoaires à squelette carbonaté observée par microscopie électronique à balayage.

Stephan Borensztajn and Caroline Thaler won the People's Choice Award in the CNRS photo competition "La preuve par l'image" (photographic evidence) for their photo entitled "Le cri" (the scream) of a colony of bryozoans with a carbonate skeleton observed through a scanning electron microscope.

#évènement
#event

L'IPGP était un des deux sites de départ et d'arrivée des participants à la Fête des personnels d'Université Paris Cité. L'occasion de se retrouver pour un moment convivial après de longs mois à distance.

The IPGP was one of the two departure and arrival sites for the Université Paris Cité staff day. It was an opportunity to meet up again for a convivial moment after long months at a distance.

sommaire/contents

Rapport annuel Annual report	Institut de physique du globe de Paris 1, rue Jussieu 75238 Paris Cedex *www.ipgp.fr*
Conception et réalisation graphique Graphic design and production	Service communication Medi@terre *mediaterre@ipgp.fr*
Rédaction Drafting	Personnels de l'IPGP et service communication. *IPGP staff and communication department.*
Impression Print	Imprimerie Chirat, labellisée Imprim'vert (charte pour la réduction de l'impact environnemental, la traçabilité et le traitement des déchets) et PEFC (papier eco-responsable). *Chirat Printing, labelled Imprim'vert (charter for the reduction of environmental impact, traceability and waste treatment) and PEFC (eco-responsible paper).*
Photos et illustrations Photos and illustrations	Banque d'images IPGP, Adobe Stock, Pierre Antoine, Antonelli, Stephan Borensztajn, Charnoz et al., CNRS, ETHZ, Emma Grégory, Landeau et al., NASA, OVPF, OVSG, OVSM, Pexels, Science, Caroline Thaler, Université Paris Cité, Unsplash, Wikipédia.
MERCI THANK YOU	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. *The IPGP's management team and communication department would like to warmly thank the researchers, professors, PhD candidates, engineers, technicians and administrative staff who participated in this issue.*

IPGP

Sciences pour la planète

Pour marquer le centenaire de l'institut, l'identité visuelle de l'IPGP évolue !

To celebrate its centennial anniversary, the IPGP's corporate design is evolving!

Depuis avril 2022, l'IPGP s'est doté d'un nouveau logo et d'une signature, marquant sa position d'institution de référence dans le domaine des sciences de la Terre et des planètes. Cette nouvelle identité, plus moderne et plus lisible, permet de mieux représenter ses missions et thématiques ainsi que son intégration au sein d'Université Paris Cité.

Since April 2022, the IPGP has a new logo and signature, marking its position as a reference institution in the field of Earth and planetary sciences. This new identity, more modern and more readable, allows to better represent its missions and research domains as well as its integration within the Université Paris Cité.

---

www.ipgp.fr/100ans

@IPGP_officiel Chaîne IPGP

© Service communication IPGP, 2022